



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**STUDI EKSPERIMEN PENERUHU VARIASI  
KECEPATAN PUTARAN KOMPRESOR  
PADA SISTEM PENGKONDISIAN UDARA  
DENGAN *PRE-COOLING***

**FARIZ IBROHIM**  
**NRP 2114 105 010**

**Dosen Pembimbing**  
**Ary Bachtiar Khrisna Putra, ST., MT., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya**  
**2016**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT  
OF COMPRESSOR ROTATION SPEED  
VARIATION IN AIR CONDITIONING SYSTEM  
WITH PRE-COOLING**

**FARIZ IBROHIM**  
**NRP 2114 105 010**

**Supervisor**  
**Ary Bachtiar Khrisna Putra, ST., MT., Ph.D.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya**  
**2016**

# **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI KECEPATAN PUTARAN KOMPRESOR PADA SISTEM PENGKONDISIAN UDARA DENGAN *PRE-COOLING***

## **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**FARIZ IBROHIM**  
NRP. 2114 105 010

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ary Bachtiar K P., ST., MT., Ph.D......(Pembimbing)  
(NIP. 197105241997021001)
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsan, M.Eng......(Penguji I)  
(NIP. 195310191979031003)
3. Ir. Kadarisman.....(Penguji II)  
(NIP. 194901091974121001)
4. Prof. Dr.Eng. Prabowo, M.Eng.....(Penguji III)  
(NIP. 196505051990031005)

**SURABAYA  
AGUSTUS, 2016**

# **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI KECEPATAN PUTARAN KOMPRESOR PADA SISTEM PENGKONDISIAN UDARA DENGAN *PRE-COOLING***

**Nama** : Fariz Ibrohim  
**NRP** : 2114 105 010  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Indonesia adalah negara beriklim tropis dimana temperatur udaranya cukup tinggi sehingga penggunaan akan sistem pendingin dan pengkondisian udara (Air Conditioning) sangatlah di butuhkan. Eksperimen kali ini adalah memodifikasi sistem pengkondisian udara biasa menjadi sistem yang baru dengan 2 (dua) unit evaporator dan 1 (satu) unit outdoor serta ditambah pre-cooling yang bertujuan untuk menaikkan performa dari sistem pengkondisian udara. Salah satu cara menaikkan perfroma sistem pengkondisian yang sudah dimodifikasi adalah dengan cara menvariasikan kecepatan putaran kompresor sehingga didapatkan performa yang maksimum.*

*Memvariasi kecepatan putaran kompresor yang akan berdampak pada berubahnya mass flow rate refrigeran sehingga kapasitas kondensor dan kapasitas evaporator akan berubah. Oleh karena itu, eksperimen ini akan melakukan variasi pada sistem modifikasi yang sama dengan 5 (lima) kecepatan putaran kompresor yang berbeda, yaitu: 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, 2700 rpm dan 3000 rpm. Ekpermen ini akan dilakukan pada masin-masing kecepatan fan evaporator dengan pengambilan data 20 kali pada 13 titik pengukuran untuk sekali variasi.*

*Hasil yang didapat dari studi eksperimen pengaruh variasi kecepatan putaran kompresor pada sistem pengkondisian udara dengan precooling memiliki performa untuk kecepatan fan low COP sebesar 5,097 dan HRR sebesar 1,175, untuk kecepatan fan*

*medium COP sebesar 5,103 dan HRR sebesar 1,176, dan untuk kecepatan fan low COP sebesar 5,201 dan HRR sebesar 1,175. Performa maksimum baik untuk kecepatan fan low, medium, dan high dari sistem yang telah dimodifikasi tersebut dicapai pada kecepatan putaran 3000 rpm dengan performa efisiensi kompresor adalah 73%, COP thermal adalah 5,09, COP elektrik adalah 4,39, HRR adalah 1,17, effectiveness 0,66 dan NTU 1,56.*

**Kata kunci:** *Sistem pengkondisian udara, modifikasi, kecepatan putaran kompresor, performa*

# **AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF COMPRESSOR ROTATION SPEED VARIATION IN AIR CONDITIONING SYSTEM WITH PRE-COOLING**

**Name** : Fariz Ibrohim  
**NRP** : 2114 105 010  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Advisor** : Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*Indonesia is known as a tropical country which has a quiet high temperature, thus the use of cooling system and air conditioning is absolutely needed. In this experimental study, tried to modify ordinary air conditioning system to be a new one by 2 (two) evaporator units with 1 (one) outdoor unit and adding pre-cooling which was to increase the performance of air conditioning system. One of ways to increase the performance of air conditioning system, which has been modified, is by varying its compressor rotation speed so that the performance of air conditioning system is in maximum.*

*Varying compressor rotation speed will affect changes in refrigerant mass flow rate. That condition also makes changes both in condenser capacity and evaporator capacity. Therefore, in this experiment, varied modification system which was similar to 5 various compressor rotation speeds, which was 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, and 3000 rpm. This experiment was done in each fan evaporator speed. The writer took up to 20 data with 13 measurement point for 1 variation.*

*The result of this experimental study showed that the performance of air conditioning system reached its fan low speed up to 5,097 of COP, and 1,175 of HRR; fan medium speed reached up to 5,103 of COP and 1,176 of HRR; and fan high speed reached up to 5,201 of COP and 1,175 of HRR. Maximum performance in fan low speed, fan medium speed, and fan high speed from those modified systems were resulted from 3000 rpm of rotation speed*

*with the performance compressor efficiency up to 73%, 5,09 of COP thermal, 4,39 of electric COP, 1,17 of HRR, 0,66 of effectiveness 0,66 and 1,56 of NTU*

***Key words:*** *air conditioning system, modification, compressor rotation speed, performance*

## DAFTAR ISI

|  |       |
|--|-------|
| COVER .....  | i     |
| HALAMAN JUDUL BAHASA INDONESIA.....  | iii   |
| HALAMAN JUDUL BAHASA INGGRIS .....   | v     |
| LEMBAR PENGESAHAN.....   | vii   |
| ABSTRAK .....  | ix    |
| ABSTRACT .....   | xi    |
| KATA PENGANTAR.....  | xiii  |
| DAFTAR ISI .....   | xvii  |
| DAFTAR GAMBAR .....  | xxiii |
| DAFTAR TABEL .....   | xxvii |
| BAB I PENDAHULUAN .....  | 1     |
| 1.1 Latar Belakang.....  | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah.....   | 2     |
| 1.3 Tujuan .....   | 2     |
| 1.4 Batasan Masalah .....  | 3     |
| 1.5 Sistematika Penulisan .....  | 3     |
| BAB II DASAR TEORI.....  | 5     |
| 2.1 Penelitian Terdahulu.....  | 5     |
| 2.1.1 Pengertian Umum.....   | 5     |
| 2.1.2 Ragil Heri Nurambyah (2011).....   | 5     |
| 2.2 Siklus Kompresi Uap.....   | 6     |
| 2.3 Komponen Utama Sistem Refrigerasi .....  | 9     |
| 2.3.1 Kompresor.....   | 9     |
| 2.3.1.1 <i>Positive Displacement Compressor</i> .....                                | 10    |
| 2.3.1.2 Kompresor Kerja Dinamik ( <i>Non Positive Displacement Compressor</i> )..... | 12    |
| 2.3.2 Kondensor .....  | 15    |
| 2.3.3 Alat Ekspansi .....  | 16    |
| 2.3.4 Evaporator .....   | 17    |
| 2.4 <i>Refrigerant</i> .....   | 19    |
| 2.5 <i>Coefficient of Performance (COP)</i> .....                                    | 20    |
| 2.5.1 <i>Coefficient of Performance (COP) Thermal</i> .....                          | 21    |
| 2.5.2 <i>Coefficient of Performance (COP) Elektrik</i> .....                         | 21    |



|   |    |
|---|----|
| 2.6 Rasio Pelepasan Kalor (HRR) .....                             | 22 |
| 2.7 <i>Heat Exchanger</i> .....                                   | 22 |
| 2.7.1 Kestimbangan Energi pada <i>Concentric Tube</i> ....        | 22 |
| 2.7.2 <i>Counterflow Heat Exchanger</i> .....                     | 24 |
| 2.7.3 Perpindahan Panas Sisi Dalam ( <i>Internal Flow</i> ) ..... | 24 |
| 2.7.4 <i>Concentric Tube Annulus</i> .....                        | 25 |
| 2.7.5 <i>Effectiveness</i> .....                                  | 26 |
| 2.7.6 <i>Number of Transfer Unit (NTU)</i> .....                  | 27 |
| BAB III METODOLOGI .....  | 29 |
| 3.1 Langkah Eksperimen .....                                      | 29 |
| 3.1.1 Perumusan Masalah.....                                      | 29 |
| 3.1.2 Studi Literatur.....  | 30 |
| 3.1.3 Pembelian Alat dan Bahan .....                              | 30 |
| 3.1.4 Perakitan Alat.....   | 30 |
| 3.1.5 Tes Kebocoran.....  | 30 |
| 3.1.6 Pengambilan Data.....                                       | 31 |
| 3.1.7 Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen .....                | 31 |
| 3.1.8 Pengambilan Kesimpulan.....                                 | 31 |
| 3.2 <i>Pre-cooling</i> .....                                      | 32 |
| 3.3 Komponen-komponen Peralatan Sistem                            |    |
| Pengkondisian Udara.....  | 33 |
| 3.3.1 Evaporator .....  | 33 |
| 3.3.2 Unit Outdoor.....   | 34 |
| 3.3.3 Kondensor .....   | 35 |
| 3.3.4 Pipa Kapiler.....   | 36 |
| 3.3.5 <i>Inverter</i> .....                                       | 36 |
| 3.3.6 Komponen-komponen pada <i>Controller Box</i> .....          | 37 |
| 3.4 Alat Ukur .....   | 38 |
| 3.4.1 <i>High-Low Pressure Gauge</i> .....                        | 39 |
| 3.4.2 <i>Flowmeter</i> .....                                      | 40 |
| 3.4.3 Clam-on Ammeter Digital.....                                | 41 |
| 3.4.4 <i>Thermocouple</i> .....                                   | 41 |
| 3.4.5 Data Akuisisi .....   | 42 |
| 3.5 Diagram Kelistrikan pada <i>Controller Box</i> .....          | 43 |
| 3.6 Diagram Perpipaian .....                                      | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 3.7 Metodologi Eksperimen .....   | 46 |
| 3.7.1 Langkah Persiapan .....   | 46 |
| 3.7.2 Langkah Pengambilan Data .....  | 46 |
| 3.7.3 Pengolahan Data.....  | 49 |
| BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA .....   | 51 |
| 4.1 Data Hasil Percobaan Tanpa <i>Precooling</i> .....  | 51 |
| 4.1.1 Contoh Perhitungan Data Tanpa <i>Precooling</i> .....   | 51 |
| 4.1.2 Konversi Satuan Tekanan Tanpa <i>Precooling</i> .....   | 52 |
| 4.1.3 Analisa Sistem Tanpa <i>Precooling</i> .....  | 52 |
| 4.1.3.1 <i>Properties</i> Refrigeran Tanpa <i>Precooling</i> .....                                      | 52 |
| 4.1.3.2 Hasil Analisa Perhitungan Sistem Tanpa<br>Menggunakan <i>Precooling</i> .....                   | 53 |
| 4.2 Perhitungan <i>Heat Exchanger</i> Tipe <i>Concentric</i><br><i>Tube</i> .....                       | 53 |
| 4.2.1 Menghitung $D_h$ .....  | 53 |
| 4.2.2 Mencari <i>Properties</i> Fluida pada <i>Heat</i><br><i>Exchanger</i> .....                       | 54 |
| 4.2.3 Menghitung Temperatur Refrigeran Keluaran <i>Heat</i><br><i>Exchanger</i> ( $T_{h_{out}}$ ) ..... | 55 |
| 4.2.4 Menghitung Laju Aliran Massa <i>water</i> ( $\dot{m}_c$ ).....                                    | 55 |
| 4.2.5 Menghitung $\Delta T_{lm}$ .....  | 56 |
| 4.2.6 Menghitung Koefisien Konveksi<br>Annulus ( $h_{out}$ ) .....                                      | 56 |
| 4.2.7 Menghitung Koefisien Konveksi<br>Internal Flow ( $h_{in}$ ) .....                                 | 57 |
| 4.2.8 Menghitung <i>Overall Heat Transfer</i><br>Coefficient (U).....                                   | 58 |
| 4.2.9 Menghitung Panjang Pipa <i>Heat Exchanger</i> .....   | 58 |
| 4.3 Data Hasil Percobaan .....  | 58 |
| 4.4 Contoh Perhitungan.....   | 59 |
| 4.4.1 Konversi Satuan Tekanan.....  | 60 |
| 4.4.2 Perhitungan Air .....   | 60 |
| 4.4.2.1 <i>Properties</i> Air .....   | 60 |
| 4.4.2.2 Energi Panas yang Diserap Air .....   | 61 |
| 4.4.3 Perhitungan Sisi Refrigeran.....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4.3.1 Properties Refrigeran .....                                  | 62 |
| 4.4.3.2 Laju Aliran Massa Refrigeran .....                           | 64 |
| 4.4.3.3 Daya Masuk .....   | 64 |
| 4.4.3.4 Kerja Termodinamika Kompresor                                |    |
| Aktual ( $\dot{W}_c$ ) .....   | 65 |
| 4.4.3.5 Kerja Termodinamika Kompresor                                |    |
| Ideal ( $\dot{W}_{cs}$ ) .....                                       | 65 |
| 4.4.3.6 Efisiensi Isentropis Kompresor ( $\eta_c$ ) .....            | 66 |
| 4.4.3.7 Kapasitas <i>Precooling</i> ( $\dot{Q}_{precooling}$ ) ..... | 66 |
| 4.4.3.8 Kapasitas Kondensor ( $\dot{Q}_c$ ) .....                    | 67 |
| 4.4.3.9 Kapasitas Total Kondensor ( $\dot{Q}_{c_{total}}$ ) .....    | 67 |
| 4.4.3.10 Kapasitas Evaporator 1 ( $\dot{Q}_{e_1}$ ) .....            | 67 |
| 4.4.3.11 Kapasitas Evaporator 2 ( $\dot{Q}_{e_2}$ ) .....            | 68 |
| 4.4.3.12 apasitas Total Evaporator ( $\dot{Q}_{e_{total}}$ ) .....   | 68 |
| 4.4.4 Perhitungan Perhitungan Performansi                            |    |
| Sistem Pengkondisian Udara .....                                     | 69 |
| 4.4.4.1 COP Termodinamika ( $COP_{thermal}$ ) .....                  | 69 |
| 4.4.4.3 COP Elektrik ( $COP_{elektrik}$ ) .....                      | 69 |
| 4.4.4.3 Rasio Pelepasan Kalor (HRR) .....                            | 70 |
| 4.4.5 Perhitungan Performansi <i>Heat Exchanger</i> .....            | 70 |
| 4.4.5.1 Menghitung Ch (MC-22) .....                                  | 71 |
| 4.4.5.2 Menghitung Cc ( <i>water</i> ) .....                         | 71 |
| 4.4.5.3 Cmin dan Cmax .....  | 72 |
| 4.4.5.4 <i>Effectiveness</i> ( $\epsilon$ ) .....                    | 72 |
| 4.4.5.6 <i>Heat Capacity Ratio</i> (Cr) .....                        | 73 |
| 4.5.5.6 Nilai NTU <i>Concentric Tube Heat Exchanger</i> .....        | 73 |
| 4.5 Analisa Grafik .....   | 73 |
| 4.5.1 Grafik Laju Aliran Massa Fungsi Kecepatan                      |    |
| Putaran Kompresor .....  | 74 |
| 4.5.2 Grafik Tekanan Masuk Kompresor Fungsi                          |    |
| Kecepatan Putaran Kompresor .....                                    | 75 |
| 4.5.3 Grafik Tekanan Keluar Kompresor Fungsi                         |    |
| Kecepatan Putaran Kompresor .....                                    | 76 |
| 4.5.4 Grafik Temperatur Refrigeran Masuk                             |    |

|   |     |
|---|-----|
| Evaporator 1 dan 2 Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                                      | 77  |
| 4.5.5 Grafik Kerja Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                            | 78  |
| 4.5.6 Grafik Efisiensi Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                        | 79  |
| 4.5.7 Grafik Kapasitas <i>Precooling</i> dan Kondensor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor ..... | 80  |
| 4.5.8 Grafik Total Kapasitas Kondensor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                  | 81  |
| 4.5.9 Grafik Kapasitas Evaporator 1 Dan 2 Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor .....              | 82  |
| 4.5.10 Grafik Total Kapasitas Evaporator Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                | 83  |
| 4.5.11 Grafik COP Thermal Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                               | 84  |
| 4.5.12 Grafik COP Elektrik Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                              | 85  |
| 4.5.13 Grafik HRR Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                                       | 86  |
| 4.5.14 Grafik <i>Effectiveness Heat Exchanger</i> Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor .....      | 87  |
| 4.5.15 Grafik NTU <i>Heat Exchanger</i> Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor.....                 | 88  |
| 4.5.16 P-h Diagram Kecepatan <i>Fan</i> Evaporator <i>Low</i> .....                             | 88  |
| 4.5.17 P-h Diagram Kecepatan <i>Fan</i> Evaporator <i>Medium</i> .....                          | 90  |
| 4.5.18 P-h Diagram Kecepatan <i>Fan</i> Evaporator <i>High</i> .....                            | 91  |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....  | 93  |
| 5.1 Kesimpulan.....   | 93  |
| 5.2 Saran.....  | 94  |
| DAFTAR PUSTAKA.....   | 95  |
| LAMPIRAN A .....  | 97  |
| LAMPIRAN B .....  | 100 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| BIOGRAFI PENULIS ..... | 111 |
|------------------------|-----|

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Grafik hasil penelitian Ragil<br>Heri Nurambyah (2011).....             | 5  |
| Gambar 2.2 Modifikasi sistem refrigerasi .....                                     | 7  |
| Gambar 2.3 p-h diagram ideal sistem refrigerasi<br>yang telah dimodifikasi.....    | 7  |
| Gambar 2.4 p-h diagram aktual sistem refrigerasi<br>yang telah dimodifikasi.....   | 9  |
| Gambar 2.5 Bagan pembagian jenis kompresor .....                                   | 10 |
| Gambar 2.6 Kompresor <i>reciprocating</i> .....                                    | 11 |
| Gambar 2.7 Kompresor <i>rotary</i> jenis <i>helical screw</i> .....                | 11 |
| Gambar 2.8 Kompresor <i>centrifugal</i> .....                                      | 12 |
| Gambar 2.9 Kompresor hermatik <i>rotary</i> .....                                  | 13 |
| Gambar 2.10 Skema termodinamika kompresor .....                                    | 14 |
| Gambar 2.11 Kondensor.....   | 15 |
| Gambar 2.12 Skema termodinamika kondensor .....                                    | 16 |
| Gambar 2.13 Pipa kapiler .....   | 17 |
| Gambar 2.14 Skema termodinamika pipa kapiler .....                                 | 17 |
| Gambar 2.15 Evaporator .....   | 18 |
| Gambar 2.16 Skema termodinamika evaporator .....                                   | 18 |
| Gambar 2.17 Keseimbangan perpindahan panas<br>antara fluida panas dan dingin ..... | 23 |
| Gambar 2.18 Distribusi temperatur<br><i>concentric heat exchanger</i> .....        | 24 |
| Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> eksperimen .....                                       | 29 |
| Gambar 3.2 <i>Flowchart pre-cooling</i> .....                                      | 32 |
| Gambar 3.3 Evaporator 1 .....  | 33 |
| Gambar 3.4 Evaporator 2 .....  | 34 |
| Gambar 3.5 <i>Oudoor unit</i> .....  | 34 |
| Gambar 3.6 <i>Air cooled condensor</i> .....                                       | 35 |
| Gambar 3.7 <i>Pre-cooling</i> .....  | 35 |
| Gambar 3.8 Pipa kapiler.....   | 36 |
| Gambar 3.9 <i>Inverter</i> .....   | 36 |
| Gambar 3.10 <i>High pressure gauge</i> 1.....                                      | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 3.11 <i>High pressure gauge</i> 2.....  | 39 |
| Gambar 3.12 <i>Low pressure gauge</i> .....  | 40 |
| Gambar 3.13 Flow meter .....   | 40 |
| Gambar 3.14 <i>Clamp-On Ammeter Digital</i> .....  | 41 |
| Gambar 3.15 <i>Thermocouple</i> tipe K .....   | 42 |
| Gambar 3.16 Data akuisisi .....  | 42 |
| Gambar 3.17 <i>Controller box</i> .....  | 43 |
| Gambar 3.18 Diagram kelistrikan .....  | 44 |
| Gambar 3.19 Diagram perpipaan sistem pengkondisian<br>udara yang telah dimodifikasi .....              | 45 |
| Gambar 3.20 <i>Flowchart</i> pengambilan data .....  | 48 |
| Gambar 3.21 <i>Flowchart</i> pengolahan data.....  | 49 |
| Gambar 4.1 Grafik laju aliran massa<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....                         | 74 |
| Gambar 4.2 Grafik tekanan masuk kompresor<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....                   | 75 |
| Gambar 4.3 Grafik tekanan keluar kompresor<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....                  | 76 |
| Gambar 4.4 Grafik temperatur refrigeran<br>masuk evaporator 1 dan 2 .....                              | 77 |
| Gambar 4.5 Grafik kerja kompresor fungsi<br>kecepatan putaran kompresor.....                           | 78 |
| Gambar 4.6 Grafik efisiensi kompresor fungsi<br>kecepatan putaran kompresor.....                       | 79 |
| Gambar 4.7 Grafik kapasitas <i>precooling</i> dan kondensor<br>fungsi kecepatan putaran kompresor..... | 80 |
| Gambar 4.8 Grafik total kapasitas kondensor<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....                 | 81 |
| Gambar 4.9 Grafik kapasitas evaporator 1 dan 2<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....              | 82 |
| Gambar 4.10 Grafik total kapasitas evaporator<br>fungsi kecepatan putaran kompresor.....               | 83 |
| Gambar 4.11 Grafik COP thermal fungsi kecepatan<br>putaran kompresor .....                             | 84 |
| Gambar 4.12 Grafik COP elektrik fungsi kecepatan   |    |

|   |    |
|---|----|
| putaran kompresor .....   | 85 |
| Gambar 4.13 Grafik HRR fungsi kecepatan putaran<br>kompresor .....                                | 86 |
| Gambar 4.14 Grafik <i>effectivenes heat exchanger</i><br>fungsi kecepatan putaran kompresor ..... | 87 |
| Gambar 4.15 Grafik NTU <i>heat exchanger</i> fungsi<br>kecepatan putaran kompresor .....          | 88 |
| Gambar 4.16 p-h diagram kecepatan fan<br>evaporator low .....                                     | 89 |
| Gambar 4.17 p-h diagram kecepatan fan<br>evaporator medium .....                                  | 90 |
| Gambar 4.18 p-h diagram kecepatan fan<br>evaporator high .....                                    | 91 |



Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Nilai Nusselt Number's .....                  | 26 |
| Tabel 3.1 Tabel spesifikasi alat .....                  | 37 |
| Tabel 4.1 Data pengukuran tanpa <i>precooling</i> ..... | 51 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia adalah negara beriklim tropis dimana temperatur udaranya cukup tinggi sehingga penggunaan akan sistem pendingin dan pengkondisian udara (*Air Conditioning*) sangatlah di butuhkan baik di dunia industri, komersial, transportasi, kesehatan, gedung-gedung perkantoran maupun rumah tangga. Pengkondisian udara adalah suatu mesin yang digunakan untuk mengkondisikan udara dengan cara menyerap kalor udara dalam ruangan kemudian kalor tersebut dilepaskan ke udara lingkungan menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap. Pada sistem kompresi uap biasa hanya terdapat masing-masing satu unit kompresor, kondensor (*air cooled condensor*), alat ekspansi dan evaporator.

Pada sistem kompresi uap, pengeluaran kalor pada kondenser dapat mencapai empat kali dari masukan daya kompresi. Temperatur refrigeran keluar kompresor dapat mencapai 50°C tergantung pada kondisi udara ambien. Karena temperatur keluaran kompresor yang masing tinggi sehingga dapat ditambahkan suatu alat *pre-cooling* yang berguna untuk meningkatkan performa dari suatu sistem pengkondisian udara. Selain meningkatkan performa dari sistem pengkondisian udara, *pre-cooling* juga dapat memanfaatkan energi buang yang pada umumnya kalor dari kondenser dibuang langsung ke udara lingkungan. Terjadi pembuangan energi sia – sia, sedangkan persediaan sumber daya energi konvensional semakin menipis dan harga nilai energi semakin meningkat. Energi buangan kondenser dapat dimanfaatkan untuk pemanasan awal fluida yang lain seperti air. Pemanfaatan energi kalor untuk pemanasan air akan menambah nilai tambah berupa penggunaan energi pemanasan air menjadi lebih kecil atau terjadi efisiensi penggunaan energi total. Oleh sebab itu, dibuatlah sistem kompresi uap yang telah dimodifikasi dengan menambahkan satu

unit *pre-cooling*, satu unit alat ekspansi serta satu unit evaporator sehingga modifikasi pada sistem pendingin dengan merubah instalasi menjadi terdapat satu unit kompresor, satu unit *pre-cooling*, dua unit alat ekspansi serta dua unit evaporator dapat memberikan hasil performansi yang berbeda, hal ini disebabkan karena perbedaan kalor total kondensor serta total kalor evaporator sehingga mempengaruhi nilai COP dari sistem.

Oleh sebab itu salah satu cara untuk mendapatkan performansi yang maksimal adalah dengan melakukan variasi terhadap putaran kompresor, putaran kompresor ini akan mempengaruhi besarnya laju aliran massa yang dikompresikan sehingga menyebabkan perubahan kerja baik pada kondensor maupun evaporator yang berpengaruh terhadap performance dari sistem itu sendiri. Variasi putaran kompresor ini dapat dilakukan dengan cara menambahkan inverter sebagai pengubah frekuensi listrik yang masuk pada kompresor. Dengan pemberian variasi putaran kompresor maka laju aliran refrigeran yang mengalir pada sistem juga akan bervariasi. Dengan variasi tersebut maka didapatkan putaran yang cocok untuk sistem yang telah dimodifikasi tersebut dengan cara mengetahui COP maksimum serta konsumsi daya kompresor minimum.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan pada latar belakang, maka rumusan masalah pada studi eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana performa dari sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi?
2. Bagaimana mendapatkan performa maksimum dari sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi dengan cara memvariasi kecepatan putaran kompresor?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan pada rumusan masalah diatas maka tujuan pada studi eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa performa dari sistem refrigersi yang telah dimodifikasi.
2. mendapatkan performa maksimum dari sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi tersebut dengan cara kecepatan putaran kompresor.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Untuk tercapainya tujuan dari studi eksperimen ini maka digunakan beberapa batasan masalah, sebagai berikut :

1. Steady state
2. Steady flow
3. Perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan
4. Tidak ada *heat loss* pada sistem
5. Refrigeran yang digunakan adalah MC-22
6. Menggunakan kompresor hermatik tipe *rotary* dengan kapasitas 815 watt
7. Alat ekspansi yang digunakan adalah jenis pipa kapiler dengan diameter 1.3716 mm dan panjang 450 mm
8. Evaporator yang digunakan adalah jenis *compact*
9. *Air cooled condensor* yang digunakan adalah jenis *compact*
10. *Pre-cooling* yang digunakan adalah jenis *concentric*
11. Untuk pengambilan data dilakukan pada pukul 01.00-03.00, pukul 07.00-09.00 dan pukul 11.00-13.00
12. Variasi putaran yang digunakan adalah 3000 rpm, 2700 rpm dan 2400 rpm
13. Alat ukur sudah terkalibrasi dengan baik.
14. Studi eksperimen dan pengambilan data di lakukan di Laboratorium Teknik Pendingin – Termodinamika dan Perpindahan Panas

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi latar belakang masalah,

perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

2. **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini disajikan mengenai teori yang mendasari penyusunan laporan tugas akhir secara umum, khususnya yang berhubungan dengan sistem refrigerasi.

3. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini menerangkan tentang semua hal yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu spesifikasi peralatan penelitian serta metode dan langkah kerja yang digunakan.

4. **BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL**

Pada bab ini berisi tentang data-data dari hasil percobaan, contoh perhitungan dan hasil penelitian yang ditampilkan dalam bentuk grafik, serta memberikan analisa tentang hasil percobaan.

5. **BAB V PENUTUP**

Pada bab ini berisi kesimpulan yang diambil dari hasil analisa penelitian dan saran-saran.

## BAB II DASAR TEORI

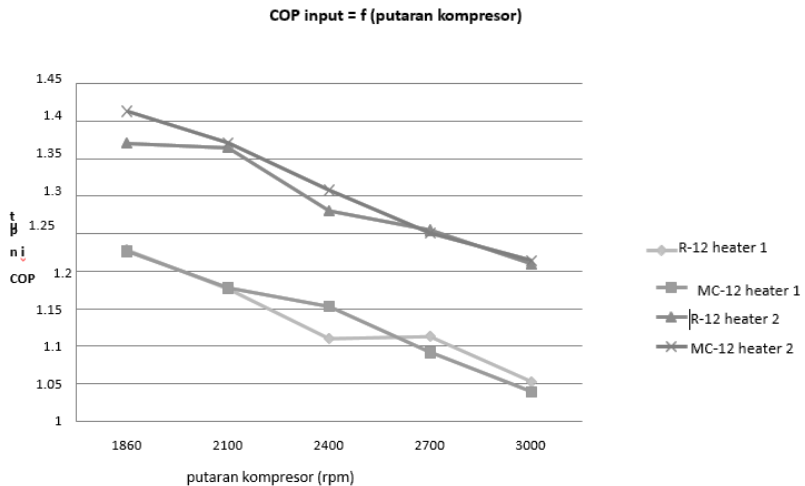
### 2.1 Penelitian Terdahulu

Telah dilakukan beberapa penelitian tentang performansi sistem refrigerasi yang menggunakan variasi frekuensi kompresor untuk sistem refrigerasi. Berikut paparan tinjauan pustaka tersebut.

#### 2.1.2 Pengertian Umum

*AC (Air Conditioner)* adalah suatu mesin yang digunakan untuk mengkondisikan udara dengan cara menyerap kalor udara dalam ruangan kemudian kalor tersebut dilepaskan ke udara lingkungan menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap.

#### 2.1.1 Ragil Heri Nurambyah (2011)



**Gambar 2.1** Grafik hasil penelitian Ragil Heri Nurambyah (2011)

Gambar diatas menunjukkan hasil penelitian Ragil Heri Nurambyah yang melakukan penelitian dengan merubah kecepatan putan kompresor pada sistem pendingin ruangan (*air conditioner*) dengan mengatur frekuensi listrik kompresor. Dalam



penelitian ragil membandingkan 2 refrigeran sebagai fluida kerja pada sistem refrigerasi. Dari hasil penelitian dapat dilihat bahwa peningkatan nilai COP berbanding terbalik dengan peningkatan kecepatan putar. Dimana COP akan semakin besar seiring dengan menurunnya kecepatan putar motor kompresor. Sebaliknya, penambahan beban pada sistem meningkatkan nilai COP dari sistem refrigerasi.

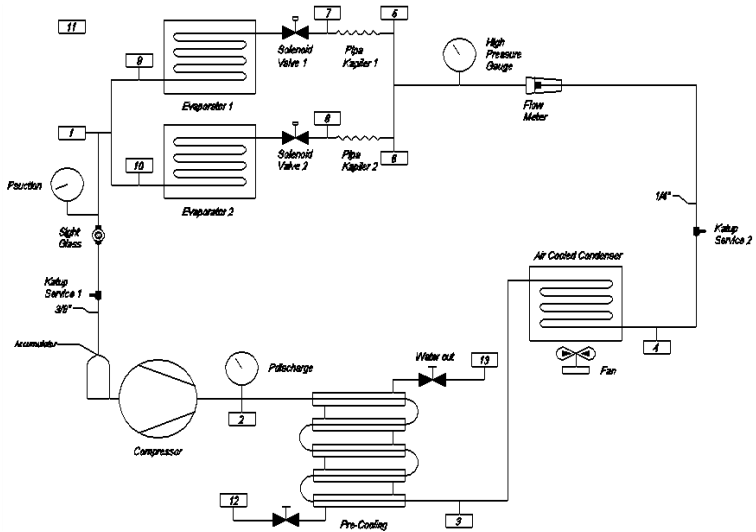
## 2.2 Siklus Kompresi Uap

Siklus refrigerasi kompresi uap mengambil keuntungan dari kenyataan bahwa fluida yang bertekanan tinggi pada temperatur tertentu cenderung menjadi lebih dingin. Jika perubahan tekanan cukup tinggi, maka gas yang ditekan akan menjadi lebih panas daripada sumber dingin di luar dan gas yang mengembang akan menjadi lebih dingin daripada temperatur dingin yang dikehendaki. Dalam kasus ini, fluida digunakan untuk mendinginkan kabin bertemperatur rendah dan membuang panas ke lingkungan yang bertemperatur tinggi.

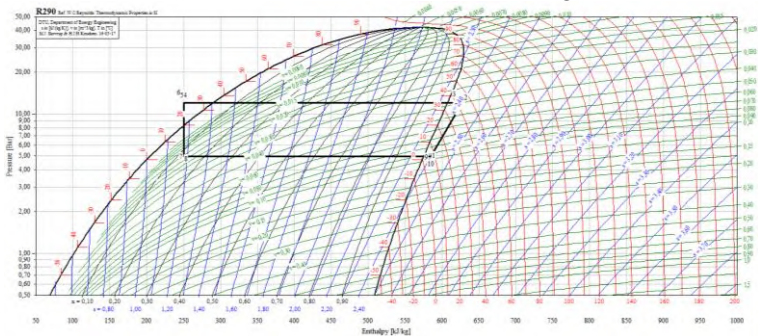
Siklus refrigerasi kompresi uap memiliki dua keuntungan. Pertama, sejumlah besar energi panas diperlukan untuk merubah cairan menjadi uap, dan oleh karena itu banyak panas yang dapat dibuang dari ruang/kabin yang didinginkan. Kedua, sifat-sifat *isothermal* penguapan membolehkan pengambilan panas tanpa menaikkan temperatur fluida kerja ke temperatur yang didinginkan. Hal ini berarti laju perpindahan panas menjadi tinggi, karena semakin dekat temperatur fluida kerja mendekati temperatur sekitarnya akan semakin rendah laju perpindahan panasnya. Fluida kerja yang biasanya digunakan adalah refrigeran. Refrigeran akan menyerap kalor dengan proses evaporasi dan membuang kalor ke ruangan lain dengan proses kondensasi.

Pada sistem ini terdapat alat penukar panas. Alat penukar panas yang pertama adalah evaporator yang berfungsi menyerap panas dari ruangan dan memindahkannya ke fluida kerja (refrigeran). Alat penukar panas yang kedua adalah kondensor yang berfungsi untuk memindahkan panas yang diterima oleh

fluida kerja ke lingkungan. Siklus kompresi uap standar pada sistem pendinginan udara terdiri dari empat komponen utama, komponen tersebut bekerja secara bersamaan membentuk suatu proses yang berulang (siklus) dengan refrigeran sebagai media yang digerakan. Dari gambar siklus refrigerasi kompresi uap diatas, dapat digambarkan siklus diagram P-h dan T-s seperti berikut ini:



**Gambar 2.2** Modifikasi sistem refrigerasi

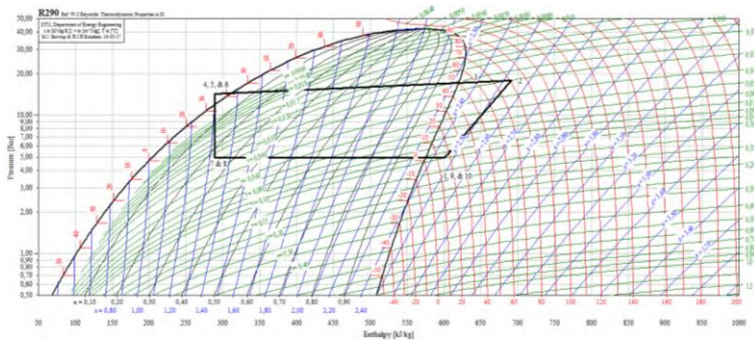


**Gambar 2.3** p-h diagram ideal sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi

Proses-proses yang membentuk siklus kompresi uap standar diatas adalah sebagai berikut :

- Proses 1 – 2 : kompresi isentropi.
- Proses 2 – 3 : pelepasan kalor secara isobaris pada *precooling*, menyebabkan penurunan panas lanjut (*desuperheating*).
- Proses 3 – 4 : pelepasan kalor secara isobaris pada *air cooled condensor*, menyebabkan penurunan panas lanjut (*desuperheating*) dan proses pengembunan (kondensasi).
- Proses 5 & 6: titik percabangan sebelum masuk pipa kapiler 1 dan pipa kapiler 2.
- Proses 5 – 7 : proses penurunan tekanan dengan isoentalpi pada pipa kapiler 1.
- Proses 6 – 8 : proses penurunan tekanan dengan isoentalpi pada pipa kapiler 2.
- Proses 7 – 9 : penambahan kalor pada tekanan tetap pada evaporator 1, yang menyebabkan penguapan menuju uap jenuh atau uap panas lanjut (*superheated*).
- Proses 8 – 10: penambahan kalor pada tekanan tetap pada evaporator 2, yang menyebabkan penguapan menuju uap jenuh atau uap panas lanjut (*superheated*).

Sedangkan pada siklus refrigerasi sebenarnya terdapat ketidak idealan pada mesin refrigerasi yang menyebabkan daur siklus kompresi uap mengalami perubahan, seperti pada Gambar 2.3 di bawah. Terjadi pengurangan efisiensi bila dibandingkan dengan daur siklus sistem kompresi ideal, hal tersebut karena adanya penurunan tekanan di dalam kondensor dan evaporator, dalam kondisi *subcooling* cairan yang meninggalkan kondensor, dan pemanasan lanjut yang meninggalkan evaporator.



**Gambar 2.4** p-h diagram aktual sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi

## 2.3 Komponen Utama Sistem Refrigerasi

Komponen utama secara umum agar sistem refrigerasi dapat bekerja dengan baik adalah sebagai berikut:

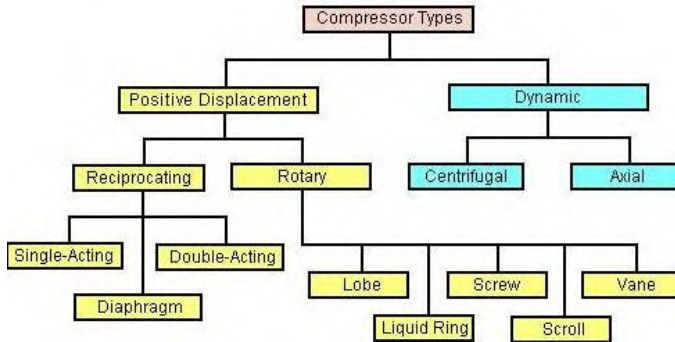
- Kompresor
- Kondensor
- *Expansion valve*
- Evaporator

Sebagaimana yang diketahui pada empat komponen utama sistem refrigerasi kompresi uap standar tidak akan dapat bekerja dengan sesuai fungsinya jika salah satu komponen tersebut tidak ada atau tidak berfungsi dengan baik.

### 2.3.1 Kompresor

Kompresor adalah peralatan mekanik yang digunakan untuk memberikan energi kepada fluida gas/udara, sehingga gas/udara dapat mengalir dari suatu tempat ke tempat lain secara kontinyu. Penambahan energi ini bisa terjadi karena adanya gerakan mekanik, dengan kata lain fungsi kompresor adalah mengubah energi mekanik (kerja) ke dalam energi tekanan (potensial). Secara umum kompresor dibagi dalam operasinya menjadi *positif displacement* dan *dynamic*.

Kerja kompresi dilakukan oleh kompresor. Kompresor pada sistem pengkondisian udara berfungsi meningkatkan tekanan uap refrigeran pada tekanan rendah keluaran evaporator agar mencapai temperatur kondensasi dengan tekanan yang lebih tinggi. Proses kompresi ideal berlangsung secara isentropik.



**Gambar 2.5** Bagan pembagian jenis kompresor  
(<https://ianatulkhoiroh.wordpress.com/2008/06/24/natural-gas-processing-process-overview/>)

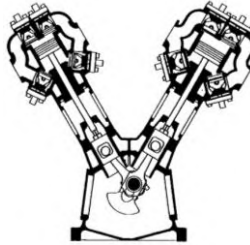
### 2.3.1.1 *Positive Displacement Compressor*

Pada Jenis *Positive Displacement Compressor* ini, sejumlah udara atau gas di kompres dalam ruang kompresi dan volumenya secara mekanik menurun, menyebabkan peningkatan tekanan kemudian di alirkan keluar. Pada kecepatan konstan, aliran udara tetap konstan dengan variasi pada tekanan pengeluaran. kompresor ini dibagi dalam dua jenis yaitu:

#### a. **Kompresor *Reciprocating***

Didalam industri, Kompresor *Reciprocating* paling banyak digunakan untuk mengompresi baik udara maupun *Refrigerant*. Prinsip kerjanya seperti pompa sepeda dengan karakteristik dimana aliran keluar tetap hampir konstan pada kisaran tekanan pengeluaran tertentu. Kapasitas kompresor propolsional langsung terhadap kecepatan keluarnya. Seperti denyutan kompresor *reciprocating* tersedia

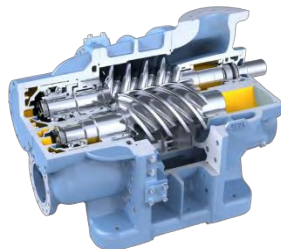
dalam berbagai konfigurasi, terdapat empat jenis yang paling banyak digunakan yaitu vertical, dan horizontal balance opposed, dan tandem. Dalam konstruksinya kompresor *resiprocating* dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu: *single acting*, *double acting*, *triplex*, dan *duplex*.



**Gambar 2.6** Kompresor *reciprocating*  
(Sumber : Sulzer-Burkhardt, Wuntherthur, Switzerland)

#### **b. Kompresor Putar / Rotary**

Kompresor Rotary mempunyai rator dalam suatu tempat dengan piston dan memberikan pengeluaran kontinyu bebas denyutan. Kompresor beroperasi pada kecepatan tinggi dan umumnya menghasilkan hasil keluaran yang lebih tinggi dibandingkan kompresor Reciprocating. Biaya investasinya rendah, bentuknya kompak, ringan dan mudah perawatannya, sehingga kompresor ini sangat populer di industri. Kompresor *rotary* terdapat beberapa jenis, yaitu: *helical screw*, *liquid ring*, *scroll*, *sliding vane* dan *lobe*.

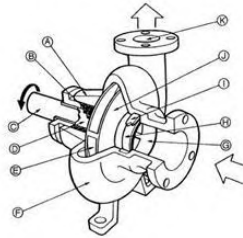


**Gambar 2.7** Kompresor *rotary* jenis *helical screw*  
(Sumber: <http://refiners-notes.blogspot.co.id/2013/06/reciprocating-compressors-operation.html>)

### 2.3.1.2 Kompresor Kerja Dinamik (*Non Positive Displacement Compressor*)

Kompresor Dinamik memberikan energi kecepatan untuk aliran udara atau gas yang kontinyu, menggunakan impeller yang berputar pada kecepatan yang sangat tinggi. Energi kecepatan berubah menjadi energi tekan karena pengaruh Impeller dan volute pengeluaran atau diffusers. Kompresor kerja dinamik terbagi dalam beberapa jenis, yaitu :

#### a. Radial Flow (Centrifugal) Compressor



**Gambar 2.8** Kompresor *centrifugal*

(Sumber:<http://www.agussuwasono.com/artikel/teknologi/mechanical/50-kavitasi-pada-pompa.html?start=1>)

Kompresor Radial adalah Kompresor yang menggunakan sistem sentrifugal dengan putaran tinggi (300-400) biasanya digerakkan oleh motor listrik, turbin uap atau turbin gas yang mempunyai karakteristik yang hampir sama. Kompresor ini biasanya digunakan untuk supercharger motor berdaya besar, terutama diesel. Didalam kompresor radial, sifat-sifat gas yang dipindah terutama volume jenis dan temperatur harus diperhitungkan.

#### b. Axial Flow Compressor

Pada kompresor aksial, umumnya fluida gas bergerak secara paralel dengan Shaft Dinamik. Energy diberikan oleh *Blade Stator* dengan pengaruh penambahan pada densitas gas dan tekanan statis

Sedangkan klasifikasi kompresor berdasarkan konstruksinya dibagi menjadi 3 macam yaitu : Hermatic dan Semi

Hermatic dan *open type* kompresor. Kompresor yang digunakan pada eksperimen sistem refrigerasi modifikasi AC split kali ini adalah dengan jenis *hermetic rotary*. Kompresor hermetik adalah sebuah kompresor dimana semua komponen-komponennya berada dalam satu rumah (selongsong), motor penggerak memutar poros kompresor hingga jumlah putaran kompresor sama dengan jumlah putaran motor penggerak. Sambungan yang digunakan adalah sambungan las sehingga kedap udara, rumah kompresor terbuat dari baja dengan pengerjaan las sehingga baik kompresor maupun penyambungannya tidak dapat dibuka maka hubungan kerumah kompresor hannya sambungan pipa hisap, sambungan pipa buang serta terminal-terminal listrik, oleh karena itu sebelum pengisian refrigerant perlu dilakukan dehidrasi yaitu pembebasan air karena dapat merusak motor. Kompresor jenis ini banyak digunakan pada AC split, kulkas, *freezer*, serta pengkondisian udara rumah tinggal.



**Gambar 2.9** Kompresor hermetik *rotary*

(Sumber : <https://hvactutorial.wordpress.com/sectioned-components/compressors/hermetic-rotary-compressor-stationary-blade>)

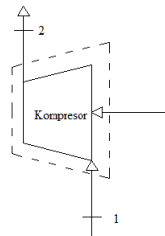
Putaran kompresor dapat diketahui dari frekuensi listrik yang terhubung dengan compressor, adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$n_c = 120 \frac{f}{p} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :  $n_c$  = kecepatan putar kompresor (rpm)



- f = frekuensi listrik (Hz)  
 p = jumlah kutub motor induksi.


 $\dot{W}_c$ 

**Gambar 2.10** Skema termodinamika kompresor

Kerja kompresi dilakukan oleh kompresor. Kompresor AC Split berfungsi meningkatkan tekanan uap refrigeran pada tekanan rendah keluaran evaporator agar mencapai temperatur kondensasi dengan tekanan yang lebih tinggi. Proses kompresi ideal berlangsung secara isentropik. Besarnya energi yang diperlukan untuk proses kompresi pada siklus refrigerasi adalah :

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :  $\dot{W}_c$  = kerja termodinamika kompresor (Watt)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

$h_2$  = entalpi keluar kompresor (kJ/kg)

$h_1$  = entalpi masuk kompresor (kJ/kg)

Kerja kompresor juga dapat diketahui dari daya listrik yang kita berikan ke kompresor, dengan rumus:

$$\dot{W}_{in} = V I \cos \phi \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :  $\dot{W}_{in}$  = kerja yang masuk ke *outdoor* (watt)

V = tegangan listrik masuk ke *outdoor* unit (Volt)

I = kuat arus yang masuk ke *outdoor* unit (Amper)

$\cos \phi$  = faktor daya (asumsi=0,953)

Untuk efisiensi yang dimiliki oleh sebuah kompresor dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_{cs}}{\dot{W}_c} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :  $\eta_c$  = efisiensi isentropi kompresor

$\dot{W}_c$  = kerja kompresor aktual (Watt)

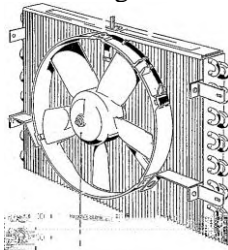
$$\begin{aligned}\dot{W}_{c_s} &= \text{kerja kompresor ideal (Watt)} \\ h_{2_s} &= \text{entalpi ideal keluar kompresor (kJ/kg)} \\ h_2 &= \text{entalpi aktual keluar kompresor (kJ/kg)} \\ h_1 &= \text{entalpi masuk kompresor (kJ/kg)}\end{aligned}$$

Untuk mendefinisikan kompresor yang baik adalah dengan cara mengetahui nilai efisiensi kompresor tersebut harus mendekati 1 (satu).

### 2.3.2 Kondensor

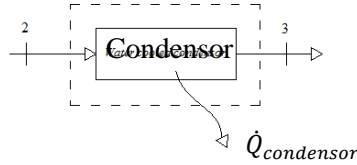
Kondensor merupakan alat penukar kalor yang berada pada daerah tekanan tinggi dari sistem refrigerasi. Kondensor berfungsi sebagai pembuang panas (*heat rejection*) dari dalam sistem ke luar sistem. Pada saat refrigeran memasuki kondensor, maka refrigeran akan mengalami perubahan fase dari gas menjadi cair (terkondensasi). Proses kondensasi berlangsung pada tekanan konstan atau isobar.

Pada sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi terdapat dua kondensor, yaitu: *precooling* dan *air cooled condensor*. *Precooling* pada sistem ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan kapasitas kondensor total yang disebabkan penambahan kapasitas evaporator karena terdapat dua buah evaporator. Pada *precooling* terjadi proses *desuperheated* dengan rumus sebagai berikut:



**Gambar 2.11** Kondensor

(<http://pamungkasaryasepa.blogspot.co.id/2011>)



**Gambar 2.12** Skema thermodinamika kondensor

$$\dot{Q}_{precooling} = \dot{m}(h_2 - h_3) \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :  $\dot{Q}_c$  = energi panas yang dibuang oleh *precooling* (Watt)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

$h_2$  = entalpi keluar kompresor (kJ/kg)

$h_3$  = entalpi keluar *precooling* (kJ/kg)

Sedangkan pada *air cooled condenser* terjadi proses *desuperheating*. Besarnya energi panas yang dibuang oleh *air cooled condenser* pada siklus ini adalah :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_4) \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :  $\dot{Q}_c$  = energi panas yang dibuang oleh *air cooled condensor* (Watt)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

$h_3$  = entalpi keluar *precooling* (kJ/kg)

$h_4$  = entalpi keluar kondensor (kJ/kg)

Untuk kapasitas kondensor total adalah penjumlahan dari kapasitas *precooling* dan kapasitas *air cooled condensor*. Sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{c_{total}} = \dot{Q}_{precooling} + \dot{Q}_c \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :  $\dot{Q}_{c_{total}}$  = total energi panas yang dibuang oleh kondensor (watt)

$\dot{Q}_{precooling}$  = energi panas yang dibuang oleh *precooling* (watt)

$\dot{Q}_c$  = energi panas yang dibuang oleh *air cooled condensor* (watt)

### 2.3.3 Alat Ekspansi

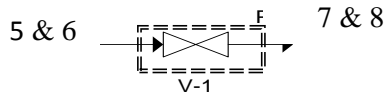
Alat ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan tinggi keluaran kondenser hingga mencapai tekanan rendah pada

evaporator agar mencapai temperatur evaporasi yang diinginkan. Alat ekspansi yang digunakan pada sistem ini adalah pipa kapiler. Sebelum masuk pipa kapiler 1 dan 2 flow refrigeran dibagi menjadi dua aliran. Dengan asumsi steady flow serta luasan pipa yang digunakan sehingga flow dibagi dua secara merata.



**Gambar 2.13** Pipa kapiler

(<http://www.hamparan-mandiri.blogspot.co.id/2014/>)



**Gambar 2.14** Skema thermodinamika pipa kapiler

Proses ideal ekspansi berlangsung secara isoentalpi. Besarnya perubahan entalpi pada proses ekspansi adalah :

$$h_5 = h_7 \dots \dots \dots (2.8)$$

$$h_6 = h_8 \dots \dots \dots (2.9)$$

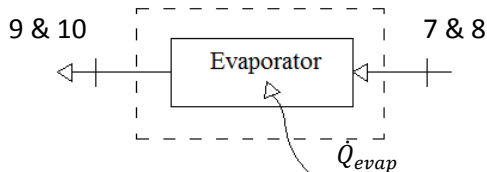
Keterangan :  $h_5$  = entalpi masuk pipa kapiler 1 (kJ/kg)  
 $h_6$  = entalpi masuk pipa kapiler 2 (kJ/kg)  
 $h_7$  = entalpi masuk evaporator 1 (kJ/kg)  
 $h_8$  = entalpi masuk evaporator 2 (kJ/kg)

### 2.3.4 Evaporator

Evaporator berfungsi untuk menyerap kalor dari produk atau udara yang akan didinginkan. Pada evaporator terjadi proses evaporasi dan refrigeran berubah fasa dari cair ke uap. Proses ideal evaporasi berlangsung secara isobar pada tekanan konstan. Pada sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi terdapat 2 buah evaporator. Akibat percabangan sebelum masuk pipa kapiler maka mass flow rate terbagi rata menjadi dua.



**Gambar 2.15** Evaporator



**Gambar 2.16** Skema thermodinamika evaporator

Besarnya efek refrigerasi atau perubahan entalpi pada proses evaporasi adalah :

$$\dot{Q}_{e_1} = \frac{\dot{m}}{2} (h_9 - h_7) \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\dot{Q}_{e_2} = \frac{\dot{m}}{2} (h_{10} - h_8) \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :  $\dot{Q}_{e_1}$  = energi panas yang diserap oleh evaporator 1 (Watt)

$\dot{Q}_{e_2}$  = energi panas yang diserap oleh evaporator 2 (Watt)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

$h_7$  = entalpi masuk evaporator 1 (kJ/kg)

$h_8$  = entalpi masuk evaporator 2 (kJ/kg)

$h_9$  = entalpi keluar evaporator 1 (kJ/kg)

$h_{10}$  = entalpi keluar evaporator 2 (kJ/kg)

Sedangkan untuk kapasitas evaporator total adalah penjumlahan dari kapasitas evaporator 1 dan kapasitas evaporator 2. Sehingga dapat ditulis sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{e_{total}} = \dot{Q}_{e_1} + \dot{Q}_{e_2} \dots \dots \dots (2.12)$$

Keterangan:  $\dot{Q}_{e_{total}}$  = total energi panas yang diserap oleh

evaporator (Watt)

$\dot{Q}_{e_1}$  = energi panas yang diserap oleh evaporator 1 (Watt)

$\dot{Q}_{e_2}$  = energi panas yang diserap oleh evaporator 2 (Watt)

Evaporator yang digunakan pada sistem refrigerasi terdapat energi yang dimasukkan berupa kerja blower yang besarnya didapat dari rumus berikut:

$$\dot{W}_{e_1} = V_{e_1} I_{e_1} \cos\phi \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\dot{W}_{e_2} = V_{e_2} I_{e_2} \cos\phi \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\dot{W}_e = \dot{W}_{e_1} + \dot{W}_{e_2} \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan:  $V_{e_1}$  = tegangan listrik yang masuk ke evaporator unit 1 (Volt)

$V_{e_2}$  = tegangan listrik yang masuk ke evaporator unit 2 (Volt)

$I_{e_1}$  = kuat arus yang masuk ke evaporator unit 1 (Amper)

$I_{e_2}$  = kuat arus yang masuk ke evaporator unit 2 (Amper)

$\cos\phi$  = faktor daya (asumsi = 0,953)

$\dot{W}_{e_1}$  = daya penggerak *fan* evaporator 1 (Watt)

$\dot{W}_{e_2}$  = daya penggerak *fan* evaporator 2 (Watt)

$\dot{W}_e$  = daya total penggerak *fan* evaporator (Watt)

## 2.4 Refrigeran

Refrigeran atau bahan pendingin adalah suatu zat yang mudah dirubah bentuknya dari gas menjadi cair atau sebaliknya, dan juga sebagai media pemindah panas dari evaporator kemudian di pindah ke kondensor. Bahan pendingin banyak sekali macamnya seperti karbon, klorin, flourin, hidrogen dan beberapa unsur penyusun lainnya. Pada dasarnya pemilihan refrigeran berdasarkan penggunaannya tergantung kebutuhan dan sistem dimana refrigeran tersebut bekerja. Dalam pemilihan refrigeran juga mempengaruhi jenis dan kapasitas kompresor, jenis oil, jenis pressure gage dan juga kapasitas elemen penyusun sistem lainnya.

Penggunaan refrigeran yang jauh berbeda dari refrigeran desain dari sistem dapat menyebabkan rusaknya kompresor, flooding di kondensor, freezing di katup ekspansi dan masalah lainnya.

Sifat refrigeran yang penting dalam pemilihan refrigeran, antara lain sifat termodinamika, kimia, dan fisik. Sifat termodinamika yang penting antara lain titik didih, tekanan penguapan dan pengembunan, tekanan dan suhu kritis, titik beku, volume uap, COP, tenaga per ton refrigerasi. Sifat kimia berhubungan dengan reaksi refrigeran terhadap keadaan sekitar, antara lain tidak mudah terbakar, tidak beracun, tidak bereaksi dengan air, minyak dan bahan konstruksi. Sedangkan sifat fisik refrigeran berhubungan dengan bahan itu sendiri, antara lain konduktivitas dan kekentalan. Refrigeran yang digunakan dalam studi eksperimen kali ini adalah MC-22. MC-22 merupakan refrigeran hidrokarbon, beberapa karakteristik MC-22 yaitu:

- Kenampakan : Cairan tidak berwarna, mudah menguap.
- Bau : Agak Amis
- Kelarutan dalam air : Tidak larut
- Sifat bahaya : Bahaya, uap lebih berat dari udara
- Komposisi : 99,7% Propane, 0,15 % Butane dan 0,15% Iso Butane

Karena 99,7 % komposisi dari MC-22 adalah propana, maka perhitungan MC-22 dapat juga dilakukan pendekatan dengan Propane atau R-290 (Aneka Firdaus, 2010).

## 2.5 Coefficient of Performance (COP)

Unjuk kerja mesin dinyatakan dengan efisiensi termal. Unjuk kerja mesin refrigerasi atau pompa kalor dinyatakan dengan perbandingan kalor yang dimanfaatkan (diserap/dilepaskan oleh sistem) terhadap kerja yang dilakukan, disebut sebagai rasio energi atau *coefficient of performance* (COP).

$$COP = \frac{\text{Energi yang dimanfaatkan}}{\text{Energi yang digunakan sebagai kerja}} \dots\dots\dots (2.16)$$

Unjuk kerja refrigerasi yang bekerja dengan baik mempunyai nilai

COP lebih dari 1 ( $COP > 1$ ).

### 2.5.1 Coefficient of Performance (COP) Thermal

*Coefficient of performance (COP)* thermal adalah unjuk kerja yang ditinjau hanya dari sisi termodinika yang dimiliki oleh sebuah sistem refrigerasi dimana energi yang digunakan sebagai kerja hanya yang dimasukkan oleh kompresor sedangkan proses kondensasi dan evaporasi terjadi secara natural (tanpa ada kerja berupa blower). Persamaan COP teoritis dapat dinyatakan seperti rumus di bawah ini:

$$COP_{thermal} = \frac{\dot{Q}_{e_{total}}}{\dot{W}_c} \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :  $COP_{thermal}$  = *Coefficient of Performance* aktual

$\dot{Q}_{e_{total}}$  = kapasitas total evaporator (Watt)

$\dot{W}_c$  = kerja termodinamika kompresor  
aktual (Watt)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

COP ideal didapat dari mengasumsikan bahwa tidak ada kerja yang diberikan berupa energi listrik yang diberikan melalui blower saat kondensasi dan evaporasi.

### 2.5.2 Coefficient of Performance (COP) Elektrik

*Coefficient of performance (COP)* elektrik adalah unjuk kerja yang ditinjau meliputi daya elektrik yang diberikan ke sistem refrigerasi. Untuk menghitung suatu prestasi aktual mesin refrigerasi berdasarkan nilai  $COP_{elektrik}$  sebagai berikut :

$$COP_{elektrik} = \frac{\dot{Q}_{e_{total}}}{\dot{W}_{in} + \dot{W}_e} \dots \dots \dots (2.18)$$

Keterangan :  $COP_{elektrik}$  = *coefficient of performance* aktual

$\dot{Q}_{e_{total}}$  = kapasitas total evaporator (watt)

$\dot{W}_{in}$  = kerja yang masuk ke *outdoor* (watt)

$\dot{W}_e$  = kerja total yang masuk ke evaporator  
(watt)



## 2.6 Rasio Pelepasan Kalor (HRR)

Laju perpindahan panas pada kondensor jika kaitannya dengan kapasitas refrigerasi dinyatakan sebagai “*Rasio Pelepasan Kalor*” atau *Heat Rejection Ratio (HRR)* dapat dinyatakan dengan membagi besarnya kalor yang dilepaskan kondensor dibagi dengan besarnya kalor yang diserap oleh refrigeran sebagai berikut.

$$HRR = \frac{\dot{Q}_{c_{total}}}{\dot{Q}_{e_{total}}} \dots \dots \dots (2.19)$$

Keterangan : HRR = rasio pelepasan kalor

$\dot{Q}_c$  = total energi panas yang dibuang oleh kondensor (Watt)

$\dot{Q}_{e_{total}}$  = total energi panas yang diserap oleh evaporator (Watt)

## 2.7 Heat Exchanger

Alat penukar kalor (Heat Exchanger) merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk menurunkan atau meningkatkan meningkatkan temperatur sebuah sistem dengan memanfaatkan suatu media pendingin atau pemanas sehingga kalor dapat berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Pada eksperimen kali ini *heat exchanger* yang digunakan adalah jenis *concentric tube*.

### 2.7.1 Kestimbangan Energi pada *Concentric Tube*

Didalam menganalisa alat penukar kalor digunakan Hukum pertama Termodinamika, dimana menyatakan bahwa perpindahan kalor rata-rata antara fluida panas sama dengan perpindahan kalor rata-rata pada fluida dingin

$$q_c = q_h \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana,

$$q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}), \text{ dan}$$

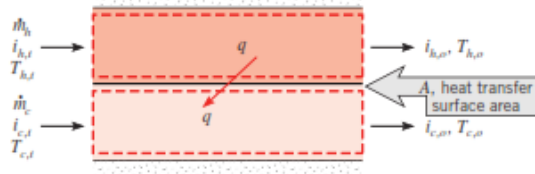
$$q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \dots \dots \dots (2.21)$$

Keterangan :  $\dot{m}_c$  = laju aliran massa fluida dingin (kg/s)

$\dot{m}_h$  = laju aliran massa fluida panas (kg/s)

$C_{p,c}$  = panas spesifik fluida dingin (kJ/kg.K)

- $C_{p,h}$  = panas spesifik fluida panas (kJ/kg.K)  
 $T_{c.in}$  = temperatur masuk fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{h.in}$  = temperatur masuk fluida panas ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{c.out}$  = temperatur keluar fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{h.out}$  = temperatur keluar fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )



**Gambar 2.17** Kestimbangan perpindahan panas antara fluida panas dan dingin

(Sumber : Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> edition – Incorpera and Dewit p.711)

Karena dalam *heat exchanger* terdapat variasi  $\Delta T$  maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$q = UA\Delta T_m \dots \dots \dots (2.22)$$

- Keterangan :
- $q$  = tapasitas *heat exchanger* (Watt)
  - $U$  = overall *heat transfer coefficient* (Watt/m<sup>2</sup>.K)
  - $A$  = luasan (m<sup>2</sup>)
  - $T_m$  = temperatur rata-rata (K)

Dengan mengabaikan faktor pengotor pada tube, Nilai *Overall heat transfer coefficient* ( $U$ ) didapatkan dengan persamaan:

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_o A_o} + \frac{1}{h_i A_i}} \dots \dots \dots (2.23)$$

- Keterangan :
- $U$  = koefisien perpindahan panas menyeluruh (W/m<sup>2</sup>.K)
  - $h_o$  = koefisien perpindahan panas konveksi sisi luar pipa (W/m<sup>2</sup>.K)
  - $h_i$  = koefisien perpindahan panas konveksi sisi dalam pipa (W/m<sup>2</sup>.K)
  - $k$  = koefisien perpindahan panas konduksi pipa (W/m.K)

$A_o$  = luas permukaan pipa sisi luar ( $m^2$ )  
 $A_i$  = luas permukaan pipa sisi dalam ( $m^2$ )

### 2.7.2 Counterflow Heat Exchanger

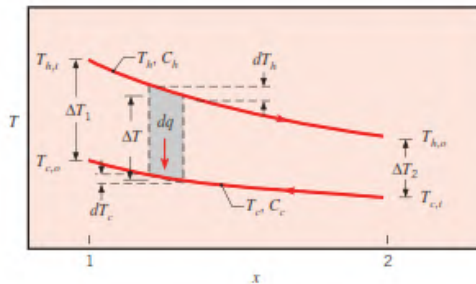
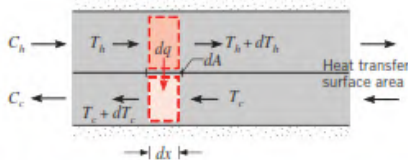
*Counterflow heat exchanger* adalah alat penukar panas yang aliran fluida berlawanan antara fluida panas dan fluida dingin.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$\Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{h,2} = T_{h,o} - T_{c,i}$$

Keterangan :  $T_{c,i}$  = Temperatur masuk fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{h,i}$  = Temperatur masuk fluida panas ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{c,o}$  = Temperatur keluar fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{h,o}$  = Temperatur keluar fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )



**Gambar 2.18** Distribusi temperatur *concentric heat exchanger*  
 (Sumber : Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> edition – Incorpera and Dewit p.714)

### 2.7.3 Perpindahan Panas Sisi Dalam ( *Internal Flow* )

Perpindahan panas di sisi *tube* tergantung pada kondisi alirannya yaitu *laminar* atau *turbulen*. Kondisi aliran dapat

diketahui dari bilangan *reynold*. Persamaan bilangan *reynold* yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \dots\dots\dots (2.25)$$

Untuk menghitung *nuselt number* di dalam *tube* pada kondisi *superheated* dapat dirumuskan sebagai berikut oleh *Dittus-Boelter*:

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \dots\dots\dots (2.26)$$

Dengan kondisi

$$\left[ \begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 16700 \\ Re_D \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

Dimana :  $n = 0,4$  untuk fluida dalam *tube* mengalami pemanasan

$n = 0,3$  untuk fluida dalam *tube* mengalami pendinginan

$$h_{refrigeran} = \frac{Nu_D \cdot K}{D_i} \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan :  $Re_D$  = Reynolds number sisi *internal tube*  
 $h_i$  = Koefisien konveksi sisi *internal tube*  
 (W/m<sup>2</sup>K)  
 $Nu_D$  = Nusselt number sisi *internal tube*  
 $\mu$  = Viskositas fluida sisi *internal tube*  
 (N.s/m<sup>2</sup>)  
 $k$  = Konduktifitas thermal (W/K)  
 $Pr$  = Prandalt number sisi *internal tube*  
 $D_i$  = Diameter dalam tube (m)

#### 2.7.4 Concentric Tube Annulus

Banyak permasalahan yang terjadi pada internal flow termasuk heat transfer pada *concentric tube annulus*. Fluida mengalir melalui celah (*annulus*) yang terbentuk pada concentric tube, dan perpindahan panas konveksi dapat terjadi dari dan/atau kedua bagian yaitu bagian dalam dan bagian luar tube. Sangat memungkinkan untuk menentukan masing-masing heat flux atau temperatur pada masing-masing kondisi permukaan. Heat flux dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q''_i = h_i(T_{s,i} - T_m) \dots\dots\dots (2.28)$$

$$q_o'' = h_o(T_{s,o} - T_m) \dots \dots \dots (2.29)$$

Perpindahan konveksi pada bagian dalam dan bagian luar permukaan pipa berbeda tergantung koefisien konveksi untuk bagian dalam dan luarnya. Nusselt numbers dapat ditulis sebagai berikut:

$$Nu_i \equiv \frac{h_o D_h}{k} \dots \dots \dots (2.30)$$

Dimana  $D_h$  adalah diameter hidrolis dari *concentric tube annulus*.  $D_h$  dapat ditulis sebagai berikut:

$$D_h = \frac{4(\pi/4)(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o + \pi D_i} = D_o - D_i \dots \dots \dots (2.31)$$

Untuk nilai Nusselt number annulus dengan aliran laminar dengan asumsi satu permukaan terisolasi dengan baik dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 2.1** Nilai Nusselt Number's

(Sumber : Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> edition – Incorpera and Dewit p.554)

| $D_i/D_o$      | $Nu_i$ | $Nu_o$ |
|----------------|--------|--------|
| 0              | —      | 3.66   |
| 0.05           | 17.46  | 4.06   |
| 0.10           | 11.56  | 4.11   |
| 0.25           | 7.37   | 4.23   |
| 0.50           | 5.74   | 4.43   |
| $\approx 1.00$ | 4.86   | 4.86   |

### 2.7.5 Effectiveness

Untuk mengetahui kinerja *heat exchanger* maka dapat digunakan *effectiveness* dari *heat exchanger* itu sendiri. Untuk mencari hal tersebut maka harus diketahui nilai perpindahan kalor maksimum ( $q_{max}$ ) dari *heat exchanger*.

Untuk nilai  $C_c < C_h$ , maka,

$$q_{max} = C_c(T_{h,i} - T_{c,i}) \dots \dots \dots (2.32)$$

Untuk nilai  $C_h < C_c$ , maka,

$$q_{max} = C_h(T_{h,i} - T_{c,i}) \dots \dots \dots (2.33)$$

dimana untuk nilai  $C_c = \dot{m}_c \cdot C_p c$  dan  $C_h = \dot{m}_h \cdot C_p h$

Dari persamaan (2.32) dan (2.33) dapat disimpulkan bahwa nilai  $q_{\max}$  dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \dots \dots \dots (2.34)$$

dimana nilai  $C_{\min}$  adalah sama dengan nilai  $C_c$  atau  $C_h$  tergantung mana yang nilainya lebih kecil.

Untuk menentukan *effectiveness* ( $\varepsilon$ ) dari *heat exchanger* dapat diperoleh dengan membandingkan antara nilai perpindahan panas aktual dengan nilai perpindahan panas maksimum sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \dots \dots \dots (2.35)$$

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \dots \dots \dots (2.36)$$

Atau

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \dots \dots \dots (2.37)$$

Keterangan:  $\varepsilon$  = *Effectiveness heat exchanger*

$C_h$  = Kapasitas panas untuk fluida panas (kJ/s.K)

$C_c$  = Kapasitas panas untuk fluida dingin (kJ/s.K)

## 2.7.6 Number of Transfer Units (NTU)

Untuk mengevaluasi kinerja *heat exchanger* tipe *concentric tube* digunakan metode *Number of Transfer Units (NTU)*. Dimana nilai  $C_{\min}/C_{\max}$  sama dengan nilai  $C_c/C_h$  atau  $C_h/C_c$  berdasarkan kapasitas panas dari fluida panas dan dingin. *The Number of Transfer Units (NTU)* merupakan parameter tidak berdimensi yang dapat digunakan untuk menganalisa *heat exchanger* sebagai berikut:

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \dots \dots \dots (2.38)$$

Keterangan: NTU = *Number of Transfer Units*

U = *Overall heat transfer coefisien* (W/m<sup>2</sup>K)

A = Luas bidang perpindahan panas, dalam m<sup>2</sup>

$C_{\min}$  = Kapasitas panas minimum (kJ/s.K)

Untuk nilai NTU pada *heat exchanger* tipe *concentric tube* dengan jenis aliran *counter* dapat digunakan perumusan sebagai berikut:

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right), \text{ untuk } (C_r < 1) \dots \dots \dots (2.39)$$

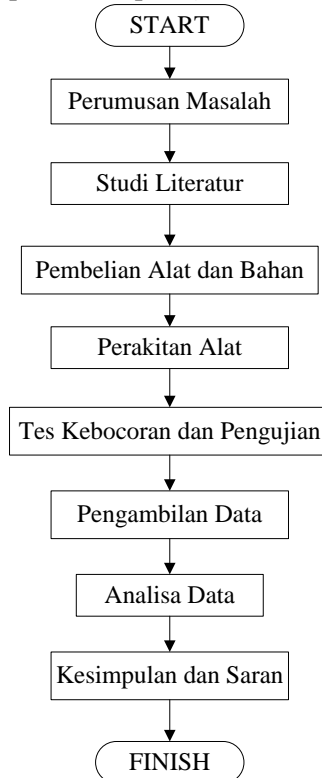
atau

$$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}, \text{ untuk } (C_r = 1) \dots \dots \dots (2.40)$$

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Langkah Eksperimen**

Berdasarkan tujuan yang telah disampaikan sebelumnya, ada beberapa langkah untuk mencapai tujuan tersebut. Langkah – langkah tersebut dapat dilihat pada *flowchart* berikut ini:



**Gambar 3.1** *Flowchart* eksperimen

#### **3.1.1 Perumusan Masalah**

Langkah pertama dari langkah analisa penelitian adalah perumusan masalah. Perumusan adalah penjelasan dari dari



identifikasi masalah, selain itu perumusan masalah diperlukan untuk membentuk kerangka berfikir dalam menyusun rencana penyelesaian percobaan termasuk merancang metode atau teknik pendekatan yang tepat untuk digunakan sebagai langkah-langkah dalam penelitian yang selanjutnya ditentukan tujuan dari penelitian ini.

### **3.1.2 Studi Literatur**

Setelah merumuskan masalah kemudian dilakukan pencarian literatur yang mendukung seperti prinsip-prinsip dasar tentang sistem refrigerasi serta penelitian-penelitian terdahulu yang ada kaitannya dengan tugas akhir penulis. Semua hasil literatur yang didapatkan akan digunakan dalam penyusunan dasar teori untuk penelitian.

### **3.1.3 Pembelian Alat dan Bahan**

Setelah mendapatkan literatur untuk eksperimen maka langkah selanjutnya adalah membeli alat dan bahan yang akan digunakan pada eksperimen kali ini. Pembelian alat dan bahan meliputi outdoor unit ac split, indoor unit ac split, pipa, kontaktor, MCB, relay, solenoid *valve*, pressure gauge, thermocouple, kabel, perak, *niple*, *nut*, blade pemotong pipa, superlon, aluminium solasi, dan *seal tape*.

### **3.1.4 Perakitan Alat**

Untuk memulai percobaan terlebih dahulu dilakukan persiapan peralatan pengujian, yaitu perakitan alat yang akan digunakan dalam pengujian. Perakitan tersebut meliputi penyambungan antar pipa dengan cara las, memasang antara nut dengan niple dan memasang alat ukur.

### **3.1.5 Tes Kebocoran dan Pengujian**

Sebelum dilakukan pengambilan data maka alat harus dicek terlebih dahulu apakah terjadi kebocoran dalam sistem. Apabila

sudah tidak ada yang bocor maka harus dilakukan pengujian agar memastikan bahwa alat tersebut dapat berjalan dengan baik.

### 3.1.6 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. Data yang didapatkan pada pengujian ini adalah berupa temperatur, tekanan pada setiap *pressure gauge*, arus listrik, dan faktor daya yang digunakan oleh kompresor. Pengujian dilakukan bergantian untuk tiap variasi panjang pipa kapiler.

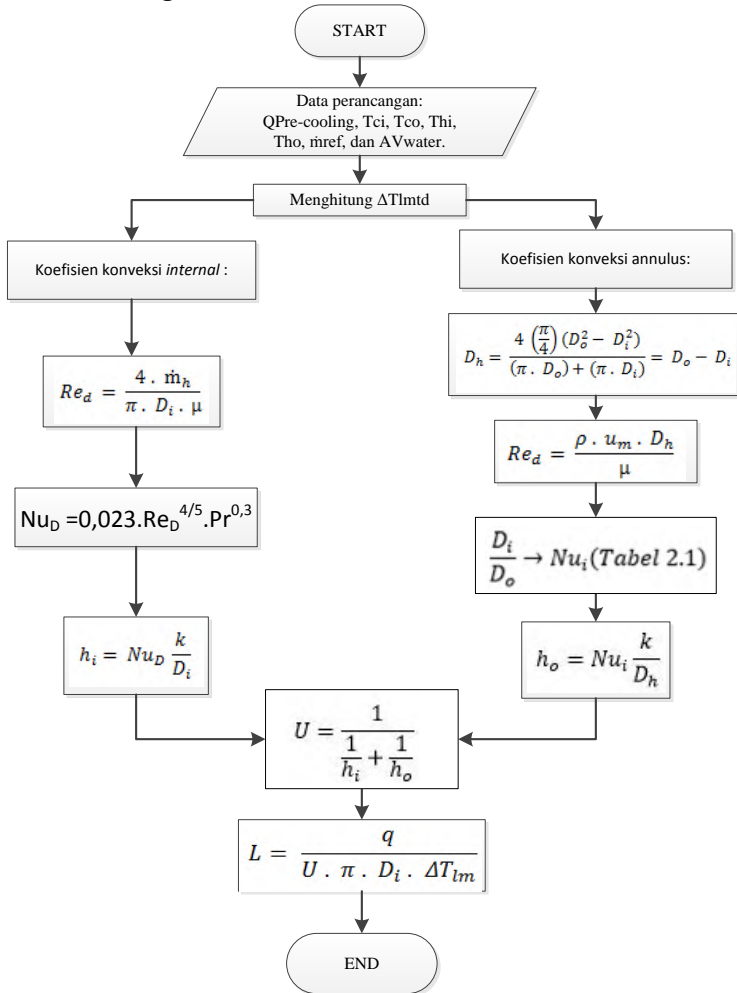
### 3.1.7 Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen

Setelah mendapatkan data dari hasil percobaan, maka data akan diolah dengan menggunakan rumus yang ada pada dasar teori. Perhitungan yang dilakukan antara lain adalah menghitung kapasitas pendinginan di evaporator, menghitung kerja isentropis dan aktual kompresor, menghitung kebutuhan daya kompresor, menghitung koefisien prestasi (COP), menghitung rasio pelepasan kalor, menghitung efisiensi kompresor ( $\eta_c$ ).

### 3.1.8 Pengambilan Kesimpulan

Dari studi eksperimen didapatkan kesimpulan berdasarkan pengolahan data yang berupa performansi yang berupa *coefficient of performance* dan rasio pelepasan kalor untuk masing-masing kecepatan putaran kompresor. Kemudian dibandingkan performansi untuk masing-masing kondisi dan variasi sehingga didapatkan performansi yang maksimum untuk setiap kondisi. Kemudian data ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk pengembangan sistem modifikasi sistem pengkondisian udara selanjutnya.

### 3.2 Pre-cooling



**Gambar 3.2** Flowchart pre-cooling  
Langkah-langkah dalam perancangan sebagai berikut:

- a) Menentukan kapasitas dari precooling, temperatur masuk refrigeran, temperatur keluar refrigeran, temperatur masuk air, temperatur keluar air, diameter dalam, diameter luar.
- b) Menghitung  $\Delta T_{lm}$ .
- c) Menghitung bilangan reynold refrigeran dan menghitung diameter hidrolis pipa annulus.
- d) Menghitung bilangan nusselt refrigeran dan bilangan reynold air.
- e) Menghitung nilai koefisien konveksi refrigeran dan nilai koefisien konveksi air.
- f) Menghitung nilai *overall heat transfer*.
- g) Menghitung panjang pipa yang dibutuhkan untuk alat penukar panas tipe *concentric*.

### 3.3 Komponen-Komponen Peralatan Sistem Pengkondisian Udara

Dalam modifikasi sistem pengkondisian udara yang akan digunakan dalam studi eksperimen ini membutuhkan beberapa komponen. Berikut ini ada komponen pada sistem pengkondisian udara yang telah dimodifikasi.

#### 3.3.1 Evaporator

- **Evaporator 1**



**Gambar 3.3** Evaporator 1

Spesifikasi

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| Merk             | : Daikin                             |
| Model            | : FT25DVM4                           |
| Tipe             | : <i>Tubes &amp; fins air cooled</i> |
| Cooling capacity | : 9000 Btu/h                         |
| Daya Blower      | : 0,035 kW                           |

- **Evaporator 2**



**Gambar 3.4** Evaporator 2

**Spesifikasi**

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| Merk             | : SHARP                              |
| Model            | : AH-A9HEV                           |
| Tipe             | : <i>Tubes &amp; fins air cooled</i> |
| Cooling capacity | : 9000 Btu/h                         |
| Daya Blower      | : 0,035 kW                           |

### 3.3.2 Unit Outdoor



**Gambar 3.5** Outdoor unit

**Spesifikasi outdoor :**

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| Merk              | : Daikin          |
| Model             | : R25DV14         |
| Tipe Kompresor    | : Rotari Hermetik |
| Horse Power       | : 1               |
| Voltage/Hz        | : 220/50          |
| Rated input power | : 0,815 kW        |
| Rated current     | : 3,94 A          |
| Refrigeran        | : MC-22           |

### 3.3.3 Kondensor

- *Air cooled condensor*



**Gambar 3.6** *Air cooled condensor*

Spesifikasi

Jenis : *Tube and fins air cooled condenser*

Tipe : *Compact heat exchanger*

Material: Pipa tembaga

- *Pre-cooling*



**Gambar 3.7** *Pre-cooling*

Spesifikasi

Jenis : *Concentric tube*

Material : Pipa tembaga

### 3.3.4 Pipa Kapiler



**Gambar 3.8** Pipa kapiler

Spesifikasi

Diameter dalam : 1.3716 mm  
Panjang pipa kapiler : 450 mm

### 3.3.5 Inverter





**Gambar 3.9** Inverter

Spesifikasi




Merk : SIEMENS  
Model : SINAMICS G110  
Input : 200-240 V  $\pm$  10% 10A 47-63Hz  
Output : 0-230 V 3.9A 0-650Hz

### 3.3.6 Komponen-komponen pada Controller Box

**Tabel 3.1** Tabel spesifikasi alat

| No | Nama komponen      | Merk /Tipe      | Foto  | Spesifikasi   |
|----|--------------------|-----------------|---|---|
| 1  | Relay              | OMRON<br>/ LY2N |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Coil ratings :</i><br/>220 VAC 4.8 mA (50 Hz) /<br/>220 VAC 4.2 mA (60 Hz) /<br/>240 VAC 5.3 mA (50 Hz) /<br/>240 VAC 4.6 mA (60 Hz)</li> <li>➤ <i>Coil resistance :</i> 18790 <math>\Omega</math></li> <li>➤ <i>Operate voltage :</i> 80 % max</li> <li>➤ <i>Release voltage :</i> 30 % Min</li> <li>➤ <i>Max. Voltage :</i> 110 % (of rated voltage)</li> <li>➤ <i>Power consumption :</i> 0.9 to 1.1 VA (60 Hz)</li> </ul> |
| 2  | Analog Timer Relay | OMRON<br>/ AT8N |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Time setting range : 0,05 sec to 100 hour (Max. Time)</li> <li>➤ Power supply : 24-240 VAC (50/60Hz)</li> </ul>  |



|   |                |                     |  |  |
|---|----------------|---------------------|--|--|
|   |                |                     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Allowable voltage range : 90 to 110% of rated voltage</li> <li>➤ Power consumption : 24-240VAC : Approx. 3,3VA</li> </ul>   |
| 3 | Kontaktor      | Schneider / LC1 D09 |   |  |
| 4 | MCB            | Schneider / C6      |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Maximum load : 6 Ampere</li> </ul>  |
| 5 | Solenoid valve | Caste 1/1020 /2     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Connection type : 1/4" flare</li> <li>➤ MOPD : 21 AC</li> <li>➤ Max./Min. Allowable temperature : - 35°C / +105°C</li> <li>➤ Maximum allowable pressure : 45 bar</li> </ul> |

### 3.4 Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan untuk pengambilan data studi eksperimen ini terdiri dari pressure gauge, flow meter, termocoupe, *clamp-on ammeter*, dan data akuisisi.

### 3.4.1 High-Low Pressure Gauge

Alat ukur tekanan yang digunakan pada sistem refrigerasi ini adalah *pressure gauge*.

- *High Pressure Gauge* berfungsi untuk mengukur tekanan kerja di sisi tekanan tinggi (*discharge*) pada mesin refrigerasi.

*High pressure gauge 1*



**Gambar 3.10** *High pressure gauge starmec*

Spesifikasi

|                    |   |
|--------------------|---|
| Merk               | : STARMEC   |
| Range Pengukuran   | : 0 psi – 500 psi<br>0 kgf/cm <sup>2</sup> – 35 kgf/cm <sup>2</sup> |
| Tingkat Ketelitian | : 5 psi<br>0.2 kgf/cm <sup>2</sup>                                  |

*High pressure gauge 2*



**Gambar 3.11** *High pressure gauge refco*

Spesifikasi

|                  |  |
|------------------|--|
| Merk             | : REFCO                                |
| Tipe             | : Classe 1,6                           |
| Range Pengukuran | : -30 psi – 500 psi<br>-1 bar – 35 bar |

Tingkat Ketelitian : 10 psi  
1 bar

- *Low Pressure Gauge* berfungsi untuk mengukur tekanan kerja di sisi tekanan rendah (*suction*) pada mesin refrigerasi.



**Gambar 3.12** *Low pressure gauge*

*Low pressure gauge*

Merk : REFCO  
Tipe : Classe 1,6  
Range Pengukuran : -30 psi – 150 psi  
-1 bar – 10 bar  
Tingkat Ketelitian : 2 psi  
0.2 bar

### 3.4.2 Flowmeter

Flow meter adalah alat yang digunakan untuk mengetahui adanya suatu aliran material ( liquid, dan gas) dalam suatu jalur aliran, pada eksperimen kali ini flow meter yang digunakan hanya satu buah saja.



**Gambar 3.13** Flow meter

### Spesifikasi

Merk : ROTA  
 Range Pengukuran : 0 – 0.07 Liter/second

### 3.4.3 Clamp-on Ammeter Digital

*Clamp-on Ammeter* merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur tegangan dan arus listrik yang mengalir pada sistem.



**Gambar 3.14** *Clamp-On Ammeter Digital*

### Spesifikasi

Merk : Sanwa  
 Tipe : DCM 601  
 Range Pengukuran : 0 – 600 Ampere  
                               0 – 600 Volt  
                               0 – 200 ohm

### 3.4.4 Thermocouple

Merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur temperatur pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan pada system, jenis *thermocouple* yang digunakan adalah tipe K. Termokopel tipe K terdiri dari: nikel dan kromoiium pada sisi positif (*Thermocouple Grade*) sedangkan sisi negatif (*Extension Grade*) terdiri dari nikel dan alumunium. *Thermocouple* jenis ini sering dipakai pada tujuan umum dikarenakan cenderung lebih murah.



**Gambar 3.15** *Thermocouple* tipe K

Spesifikasi

|                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| Tipe               | : <i>Thermocouple</i> tipe K |
| Bahan sisi positif | : Nikel dan kromium          |
| Bahan sisi negatif | : Nikel dan aluminium        |
| Range Pengukuran   | : 0 – 1100 °C                |

### 3.4.5 Data Akuisisi

Alat yang digunakan mengakuisisi data dari *termocouple* yang di rekap secara otomatis berdasarkan waktu. Waktu tersebut dapat diatur pada *software* yang sudah harus terinstal di laptop atau PC. Input *thermocouple* dapat lebih dari sepuluh, namun dalam penelitian ini hanya digunakan sembilan *thermocouple* yang masing-masing menunjukkan temperature air, refrigeran pada masuk kompresor, keluar kompresor, keluar kondensor berpendingin air, keluar kondensor berpendingin udara, keluar dari pipa kapiler, masuk evaporator, dan keluar evaporator.



**Gambar 3.16** Data akuisisi

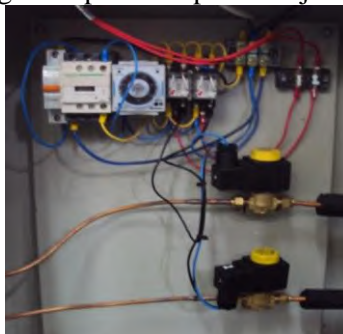
Spesifikasi

|      |            |
|------|------------|
| Merk | : YOKOGAWA |
|------|------------|

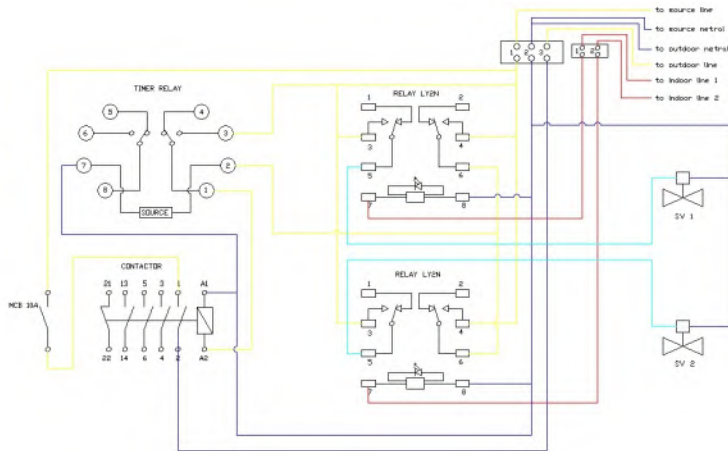
Tipe : MX100  
 Language : English  
 Supply voltage : 100VAC-240VAC

### 3.5 Diagram Kelistrikan pada *Controller Box*

Sistem kelistrikan pada *controller box* ini memiliki diagram kelistrikan yang sederhana seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14. Masing-masing unit indoor akan memberikan sinyal kepada masing-masing relay, kemudian sinyal tersebut akan mengalirkan listrik kedalam koil sehingga mempunyai gaya elektromagnetis yang berfungsi untuk menghubungkan jalur *normally close* (NO) menjadi terhubung, pada relay tipe LY2N terdapat 2 terminal, terminal 1 akan langsung mengalirkan arus pada SV sehingga katup SV akan terbuka, kemudian terminal 2 akan mengalirkan arus kedalam timer yang akan memicu kontak NO pada timer menjadi terhubung setelah *delay time* pada timer telah mencapai waktu yang telah ditentukan, setelah arus terhubung pada timer relay maka arusnya akan mengalir dan mengaktifkan koil pada komponen yang terakhir yaitu kontaktor, prinsip kontaktor pada hampir sama dengan relay hanya saja kontaktor digunakan untuk arus yang lebih besar dimana pada rangkaian ini kontaktor akan menghubungkan jalur pada motor kompresor sehingga kompresor dapat bekerja.



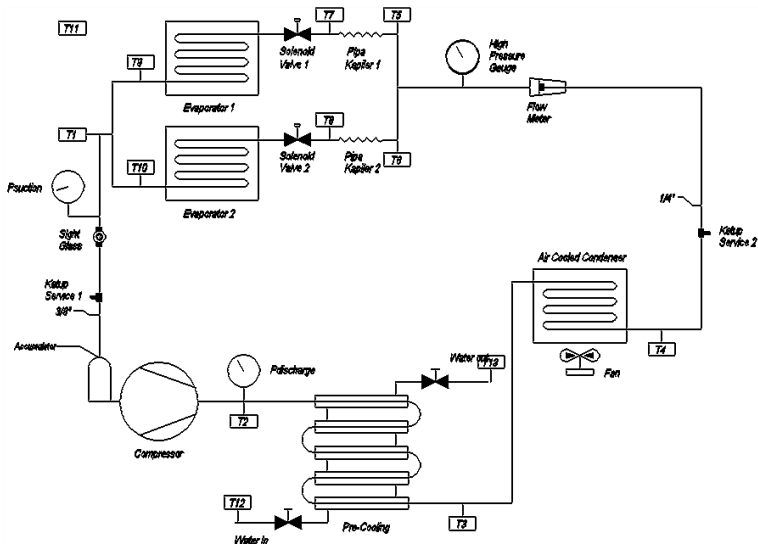
**Gambar 3.17** *Controller box*



**Gambar 3.18** Diagram kelistrikan

### 3.6 Diagram Perpipa

Sistem AC split yang sudah dimodifikasi memiliki alur yaitu kompresor menaikkan tekanan refrigeran secara isentropi yang selanjutnya panas dibuang di kondensor berpendingin air yang akan merubah fase refrigeran menjadi fase campuran. Setelah itu refrigeran masuk ke kondensor berpendingin udara sehingga refrigeran berubah fase menjadi fase *saturated liquid* atau bahkan *subcool*. Setelah keluar dari kondensor berpendingin udara maka aliran refrigeran dibagi menjadi dua yang selanjutnya akan dialirkan ke pipa kapiler guna menurunkan tekanan ke tekanan evaporasi secara isoentalpi. Kemudian hasil keluaran dari pipa kapiler akan melewati evaporator yang akan menyerap panas lingkungan guna mendinginkan ruangan sekaligus merubah fase refrigeran menjadi fase *saturated vapor*. Setelah keluar dari masing-masing evaporator, kedua aliran refrigeran tersebut digabung lagi sebelum memasuki kompresor. Proses tersebut berulang secara terus menerus hingga sistem pengkondisian udara non aktif. Diagram perpipa serta titik ukur pada mesin sistem pengkondisian udara yang telah dimodifikasi seperti pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.19** Diagram perpipaan sistem pengkondisian udara yang telah dimodifikasi

Keterangan:

- $T_1$  = Temperatur refrigeran masuk kompresor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_2$  = Temperatur refrigeran keluar kompresor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_3$  = Temperatur refrigeran keluar *precooling* ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_4$  = Temperatur refrigeran keluar *air cooled condensor* ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_5$  = Temperatur refrigeran masuk pipa kapiler 1 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_6$  = Temperatur refrigeran masuk pipa kapiler 2 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_7$  = Temperatur refrigeran masuk evaporator 1 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_8$  = Temperatur refrigeran masuk evaporator 2 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_9$  = Temperatur refrigeran keluar evaporator 1 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{10}$  = Temperatur refrigeran keluar evaporator 2 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{11}$  = Temperatur air masuk *precooling* ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{12}$  = Temperatur air keluar *precooling* ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{13}$  = Temperatur udara lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $P_s$  = Tekanan refrigeran masuk kompresor (Psi)
- $P_d$  = Tekanan refrigeran keluar kompresor (Psi)
- $P$  = Tekanan refrigeran keluar kondensor (Psi)



### 3.7 Metodologi Eksperimen

Pengujian pada sistem modifikasi sistem pengkondisian udara ini menggunakan refrigeran R-22 dengan tiga variasi panjang pipa kapiler. Pengambilan data akan dilakukan dari awal mulai *running* hingga kondisi sistem *steady*. Jika temperatur di dalam sistem sudah konstan (*steady*) maka pengambilan data dapat dianggap cukup. Prosedur dalam eksperimen ini terdiri dari empat langkah, yaitu langkah persiapan, pengambilan data, pengolahan data, dan penarikan kesimpulan.

#### 3.7.1 Langkah Persiapan

Berikut langkah persiapan dalam pengambilan data:

- a) Memastikan kondisi lingkungan sekitar aman dan tidak ada yang berpotensi untuk mengganggu kinerja alat.
- b) Memastikan peralatan uji dalam keadaan bersih dan berfungsi sebagaimana mestinya.
- c) Memastikan semua kondisi kelistrikan dalam keadaan siap dan terpasang dengan baik.
- d) Memastikan kontak (colokan) yang terpasang ke sumber (PLN) tidak terbalik antara phase dan netralnya.
- e) Memastikan *globe valve* dan katup service pada *discharge* dan *suction* telah terbuka agar refrigeran dapat mengalir.
- f) Memvakum sistem menggunakan pompa vakum untuk mengeluarkan uap air yang ada dalam sistem hingga tekanan di sistem -30 psia.
- g) Melakukan cek kebocoran dengan melihat *pressure gauge* apakah tekanan vakum bertambah atau tidak.
- h) Jika sistem tidak bocor maka langkah selanjutnya adalah mengisi refrigeran R-22

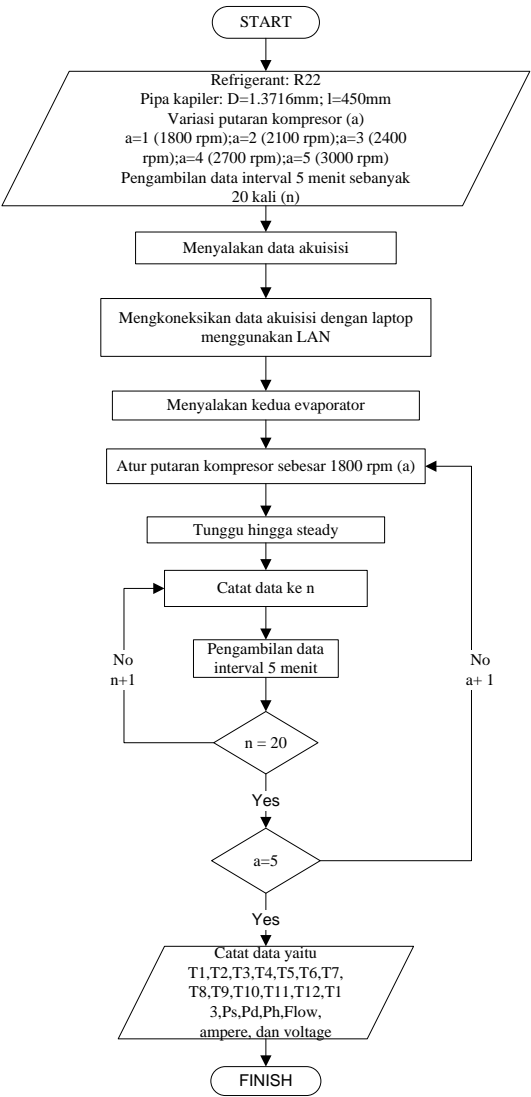
#### 3.7.2 Pengambilan Data

Berikut langkah dalam pengambilan data:

- a) Menyalakan data akuisisi.
- b) Koneksikan laptop dengan data akuisis menggunakan kabel LAN.

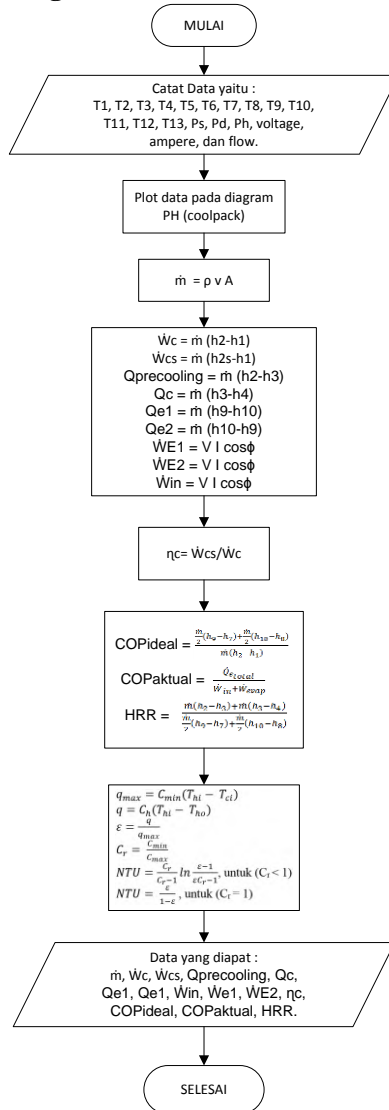
- c) Menyalakan *fan* pada kedua evaporator menggunakan masing-masing *remote control*.
- d) Menunggu indoor mengirimkan sinyal ke relay pada *box controller*.
- e) Mengecek apakah selenoid valve telah terbuka.
- f) Menyalakan ammeter kemudian memasangkannya pada kablen kompresor untuk mengetahui arus listrik yang mengalir pada kompresor.
- g) Mengamati tekanan pada *pressure gauge*, apakah sudah sesuai dengan tekanan kerjanya atau belum. Jika belum maka tunggu sampai sesuai.
- h) Mengamati temperatur pada semua titik pada laptop yang diukur menggunakan *thermocouple* melalui data akuisisi.
- i) Menunggu sistem berjalan sampai *steady*, dimana *properties* seperti temperatur dan tekanan pada semua titik sudah tidak berubah-ubah lagi atau berubah tapi besarnya tidak terlalu signifikan.
- j) Setting putaran kompresor 3000 rpm
- k) Setelah kondisi sistem *steady*, catat data tekanan dari *low* dan *high pressure*, *mass flow rate* dari *flow meter*, arus listrik serta voltage yang mengalir dari ammeter dengan interval waktu 5 menit dan khusus untuk temperatur data sudah tercatat pada laptop sesuai dengan interval waktu yang telah ditentukan pada data akuisisi. Pengambilan data untuk tiap kecepatan dan masing-masing beban sebanyak 20 kali.
- l) Setelah didapatkan 20 data untuk masing-masing beban, maka putaran motor dinaikkan ke 2700 rpm dan 2400 rpm
- m) Ulang langkah i hingga k  
Setelah pengambilan data selesai maka matikan sistem dengan menekan tombol *off* pada masing-masing *remote AC* dengan demikian kompresor akan berhenti dan selenoid

valve akan menutup, kemudian cabut steker dari sumber listrik.



Gambar 3.20 Flowchart pengambilan data

### 3.7.3 Langkah Pengolahan Data



**Gambar 3.21** Flowchart pengolahan data

Berikut langkah-langkah dalam pengolahan data:

- a) Setelah didapatkan data berupa temperatur, tekanan, voltage, arus listrik dan *flow rate* (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, Ps, Pd, Ph, V, I, dan AV) yang didapat dari proses pengambilan data.
- b) Cari properti dari masing-masing berupa entalpi (h) dan entropi (s).
- c) Plot data tersebut ke p-h diagram dengan menggunakan aplikasi *coolpack*.
- d) Hitung *mass flow rate*.
- e) Hitung kerja kompresor aktual ( $\dot{W}_c$ ), Hitung kerja kompresor teoritis ( $\dot{W}_{cs}$ ), kapasitas *precooling* ( $\dot{Q}_{precooling}$ ), kapasitas kondensor ( $\dot{Q}_c$ ), kapasitas evaporator 1 ( $\dot{Q}_{e1}$ ), kapasitas evaporator 2 ( $\dot{Q}_{e2}$ ), kerja yang masuk ke evaporator 1 ( $\dot{W}_{e1}$ ), kerja yang masuk ke evaporator 2 ( $\dot{W}_{e2}$ ) dan daya yang masuk ke kompresor ( $\dot{W}_{in}$ ).
- f) Menghitung efisiensi kompresor ( $\eta_c$ )
- g) Menghitung COP aktual, COP ideal dan HRR
- h) Menghitung *effectiveness* dan NTU *heat exchanger*
- i) Plot hasil hitung dari langkah e hingga h kedalam grafik.

## BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA

### 4.1 Data Hasil Percobaan Tanpa *Precooling*

Data percobaan tanpa menggunakan heat exchanger adalah data awal yang akan digunakan sebagai dasar perancangan dari *heat exchanger* itu sendiri. Kapiler yang digunakan adalah kapiler berukuran 35 cm dan menggunakan refrigeran Musicool-22. Data hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran.

#### 4.1.1 Contoh Perhitungan Data Tanpa *Precooling*

Data yang digunakan sebagai data analisa adalah data pada saat sistem telah steady, kemudian data tersebut dirata-rata untuk mewakili data pada kondisi steady pada satu variasi data, berikut ini adalah data hasil rata-rata dari percobaan tanpa menggunakan *heat exchanger* dengan panjang pipa kapiler 35 cm :

**Tabel 4.1** Data pengukuran tanpa *precooling*

|   |                 |           |
|---|-----------------|-----------|
| Temperatur <i>suction</i>                   | T <sub>1</sub>  | 23,47°C   |
| Temperatur <i>discharge</i>                 | T <sub>2</sub>  | 68,40°C   |
| Temperatur <i>out air cooled condenser</i>  | T <sub>4</sub>  | 34,23°C   |
| Temperatur <i>in</i> pipa kapiler 1         | T <sub>5</sub>  | 30,60°C   |
| Temperatur <i>in</i> pipa kapiler 2         | T <sub>6</sub>  | 30,20°C   |
| Temperatur <i>out</i> pipa kapiler 1        | T <sub>7</sub>  | 6,93°C    |
| Temperatur <i>out</i> pipa kapiler 2        | T <sub>8</sub>  | 6,93°C    |
| Temperatur <i>out</i> evaporator 1          | T <sub>9</sub>  | 22,50°C   |
| Temperatur <i>out</i> evaporator 2          | T <sub>10</sub> | 23,70°C   |
| Temperatur lingkungan                       | T <sub>13</sub> | 28,10°C   |
| Tekanan <i>suction</i>                      | P <sub>1</sub>  | 60 Psig   |
| Tekanan <i>discharge</i>                    | P <sub>2</sub>  | 165 Psig  |
| Tekanan setelah <i>air cooled condenser</i> | P <sub>4</sub>  | 164 Psig  |
| Laju aliran volume                          | AV              | 0,014 l/s |
| Arus listrik                                | I               | 2,1 A     |
| Tegangan listrik                            | V               | 220 V     |
| Cos $\phi$                                  |                 | 0,953     |

#### 4.1.2 Konversi Satuan Tekanan Tanpa *Precooling*

Konversi satuan tekanan dilakukan untuk memudahkan dalam mencari *properties* refrigeran dan menggambar P-h diagram pada *Software Coolpack*. Konversi satuan tekanan dilakukan dengan cara mengubah tekanan *gauge* menjadi *absolute* dengan cara menambahkannya dengan angka 14.69595 sehingga satuan tekanannya menjadi Psia, kemudian mengkonversi satuan Psia menjadi bar dengan cara mengalikan tekanan tersebut dengan angka 0,06894 sehingga satuan tekanannya menjadi bar. Berikut adalah konversi satuan tekanan dari data yang telah didapatkan :

- Tekanan *suction*  

$$P1 = (60 + 14,69595) \times 0,06894 = 5,15 \text{ bar}$$
- Tekanan *discharge*  

$$P2 = (165 + 14,69595) \times 0,06894 = 12,39 \text{ bar}$$
- Tekanan setelah *air cooled condenser*  

$$P4 = (164 + 14,69595) \times 0,06894 = 12,32 \text{ bar}$$

#### 4.1.3 Analisa Sistem Tanpa *Precooling*

##### 4.1.3.1 *Properties* Refrigeran Tanpa *Precooling*

Pada penelitian kali ini untuk mencari *properties* dari refrigeran digunakan *software* REFPROP, *properties* yang digunakan adalah R-290 hal ini dikarenakan 99,7 % komposisi dari Musicool-22 adalah propana, maka perhitungan Musicool-22 dapat juga dilakukan pendekatan dengan *propane* atau R-290. Dengan menggunakan *software* tersebut maka didapatkan nilai entalpi sebagai berikut :

- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| • $h_1 = 614,72 \text{ kJ/kg}$    | • $h_6 = 280,48 \text{ kJ/kg}$    |
| • $h_2 = 679,87 \text{ kJ/kg}$    | • $h_7 = 281,87 \text{ kJ/kg}$    |
| • $h_{2s} = 660,39 \text{ kJ/kg}$ | • $h_8 = 280,48 \text{ kJ/kg}$    |
| • $h_4 = 290,65 \text{ kJ/kg}$    | • $h_9 = 612,98 \text{ kJ/kg}$    |
| • $h_5 = 281,87 \text{ kJ/kg}$    | • $h_{10} = 615,13 \text{ kJ/kg}$ |

#### 4.1.3.2 Hasil Analisa Perhitungan Sistem Tanpa Menggunakan *Precooling*

Berikut ini adalah tabel analisa dari perhitungan sistem tanpa menggunakan *heat exchanger*, perumusan yang digunakan sesuai dengan teori pada BAB II, hasil data tersebut akan diplotkan pada *software coolpack* kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapasitas pre-cooling, berikut ini adalah hasil perhitungan dari sistem tanpa menggunakan *heat exchanger* :

- Massa jenis refrigeran ( $\rho$ ) : 477,54 kg/m<sup>3</sup>
- Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) : 0,0067 kg/s
- Daya input kompresor ( $W_{in}$ ) : 0,4403 kW
- Kerja isentropis kompresor ( $W_{cs}$ ) : 0,3073 kW
- Kerja aktual kompresor ( $W_c$ ) : 0,4373 kW
- Effisiensi kompresor ( $\eta_c$ ) : 0,4373 kW
- Total daya input fan evaporator ( $W_{evap}$ ) : 0,07 kW
- Kapasitas kondensor ( $Q_c$ ) : 2,6022 kW
- Kapasitas evaporator 1 ( $Q_c$ ) : 1,1068 kW
- Kapasitas evaporator 2 ( $Q_c$ ) : 1,1187 kW
- *Coefficient of Performance* (COP) : 5,08

#### 4.2 Perhitungan *Heat Exchanger Tipe Concentric Tube*

Setelah melakukan analisa dari percobaan sistem modifikasi pengkondisian udara tersebut maka didapatkan kapasitas *heat exchanger* atau proses *pre-cooling* sebesar 350 Watt. Berikut ini adalah data yang diperlukan untuk perancangan *heat exchanger tipe concentric tube* :

- $T_{c_{in}}$  : 28 °C
- $T_{c_{out}}$  : 45 °C
- $T_{h_{in}}$  : 68,4 °C
- $D_{out}$  : 0,0233 m
- $D_{in}$  : 0,0131 m
- $\dot{m}_{ref}$  : 0,007 kg/s
- $q$  : 350 W

##### 4.2.1 Menghitung $D_h$

$D_h$  adalah diameter hidrolis dari *concentric tube annulus*.  $D_h$  dapat dicari sesuai dengan perumusan 2.23 sebagai berikut :



$$D_h = \frac{4(\pi/4)(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o + \pi D_i}$$

$$D_h = \frac{4(\pi/4)(0,0233^2 - 0,0131^2)}{\pi \times 0,0233 + \pi \times 0,0131}$$

$$D_h = 0,0092$$

#### 4.2.2 Mencari Properties Fluida pada *Heat Exchanger*

##### • Properties water

Untuk mencari properties water pada perhitungan *heat exchanger*, *software* yang digunakan adalah *REFPROP* dengan kondisi temperatur rata-rata perancangan *inlet* dan *outlet* pada *heat exchanger* dan tekanan 1 atm maka *properties* yang didapat adalah sebagai berikut :

$$\bar{T}_h = \frac{28^\circ\text{C} + 45^\circ\text{C}}{2} = 36,5^\circ\text{C}$$

$$C_p = 4,1792 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\mu = 0,0007 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$k = 0,6255 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\rho = 993,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_r = 4,6637$$

##### • Properties Refrigeran

Untuk mencari properties refrigeran R-290 pada perhitungan *heat exchanger*, *software* yang digunakan adalah *REFPROP* dengan kondisi erimesi temperatur rata-rata dan tekanan discharge refrigeran pada titik 2 yaitu 12,39 bar maka *properties* yang didapat adalah sebagai berikut :

$$\bar{T}_h \approx 63,4^\circ\text{C}$$

$$C_p = 2,101 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\mu = 0,0000095442 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$k = 0,024423 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\rho = 22,442 \frac{kg}{m^3}$$

$$P_r = 0,82105$$

#### 4.2.3 Menghitung Temperatur Refrigeran Keluaran *Heat Exchanger* ( $Th_{out}$ )

Dengan menggunakan persamaan *energy balance* maka dapat ditentukan  $Th_{out}$  sesuai dengan persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$q = \dot{m}_h \times C_{p,h}(Th_{in} - Th_{out})$$

Maka

$$Th_{out} = Th_{in} - \left( \frac{q}{\dot{m}_h \times C_{p,h}} \right)$$

$$Th_{out} = 68,4^\circ C - \left( \frac{0,350 \text{ kW}}{0,007 \frac{kg}{s} \times 2,101 \frac{kJ}{kg \cdot K}} \right)$$

$$Th_{out} = 44,6^\circ C$$

#### 4.2.4 Menghitung Laju Aliran Massa *water* ( $\dot{m}_c$ )

Dengan menggunakan persamaan *energy balance* maka dapat ditentukan laju aliran massa ( $\dot{m}_c$ ) dari *water* sesuai dengan persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$q = \dot{m}_c \times C_{p,c}(Tc_{out} - Tc_{in})$$

Maka

$$\dot{m}_c = \frac{q}{C_{p,c} \times (Tc_{out} - Tc_{in})}$$

$$\dot{m}_c = \frac{0,350 \text{ kW}}{4,1792 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (45^\circ C - 28^\circ C)}$$

$$\dot{m}_c = 0,00493 \frac{kg}{s}$$

#### 4.2.5 Menghitung $\Delta T_{lm}$

Untuk menghitung  $\Delta T_{lm}$  pada *counterflow heat exchanger* dimana aliran fluida panas dan fluida dingin mengalir secara berlawanan maka dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$\Delta T_{lm} = \frac{(Th_{in} - Tc_{out}) - (Th_{out} - Tc_{in})}{\ln \left[ \frac{(Th_{in} - Tc_{out})}{(Th_{out} - Tc_{in})} \right]}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(68,4^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}) - (44,6^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C})}{\ln \left[ \frac{(68,4^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C})}{(44,6^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C})} \right]}$$

$$\Delta T_{lm} = 19,80^{\circ}\text{C}$$

#### 4.2.6 Menghitung Koefisien Konveksi Annulus ( $h_{out}$ )

Untuk dapat menghitung koefisien konveksi pada annulus terlebih dahulu menghitung bilangan tak berdimensi seperti reynold number dan nuselt number :

- Mencari bilangan Reynold

$$Re_D = \frac{\rho \times (D_o - D_i) \times \dot{m}_c}{\mu \times \rho \times \pi (D_o^2 - D_i^2) / 4}$$

$$Re_D = \frac{993,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (0,0233 - 0,0131) \text{m} \times 0,00493 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,0007 \text{ Pa.s} \times 993,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\pi}{4} (0,0233 - 0,0131) \text{m}^2}$$

$$Re_D = 253,817$$

- Mencari  $D_i/D_o$

$$D_i/D_o = \frac{D_i}{D_o}$$

$$D_i/D_o = \frac{0,0131 \text{ m}}{0,0233 \text{ m}}$$

$$D_i/D_o = 0,5874$$

- Untuk mencari nilai Nusselt ( $Nu_D$ ) number annulus aliran laminar dengan asumsi satu permukaan terisolasi dengan baik maka dapat dilihat pada tabel 2.1 Nilai Nusselt Number's.

Dengan nilai  $D_i/D_o = 0,5874$  maka perlu dilakukan interpolasi untuk mendapatkan  $Nu_D$  :

$$Nu_D = \left[ \frac{(0,5 - 0,5874)}{(0,5 - 1)} \right] \times (4,86 - 5,74) + 5,74$$

$$Nu_D = 5,586$$

- Mencari koefisien konveksi annulus ( $h_{out}$ )

$$h_{out} = \frac{Nu_D \times k}{D_h}$$

$$h_{out} = \frac{5,586 \times 0,6255 \frac{W}{m \cdot K}}{0,0092 m}$$

$$h_{out} = 379,837 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

#### 4.2.7 Menghitung Koefisien Konveksi *Internal Flow* ( $h_{in}$ )

Untuk dapat menghitung koefisien konveksi pada *internal flow* terlebih dahulu menghitung bilangan tak berdimensi seperti *reynold number* dan *nuselt number*

- Mencari bilangan Reynold

$$Re_D = \frac{4\dot{m}_h}{\pi \times D_i \times \mu}$$

$$Re_D = \frac{4 \times 0,007 \frac{kg}{s}}{\pi \times 0,0131 m \times 9,5442 \times 10^{-6} Pa \cdot s}$$

$$Re_D = 71284,86$$

- Mencari nilai Nusselt ( $Nu_D$ )

Untuk menghitung *nuselt number* di dalam *tube* pada kondisi *superheated* dengan kondisi fluida dalam tube mengalami proses pendinginan maka nilai  $n = 0,3$  seperti perumusan 2.20 sebagai berikut :

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,3}$$

$$Nu_D = 0,023 \times 71284,86^{0,8} \times 0,82105^{0,3}$$

$$Nu_D = 165,362$$

- Mencari koefisien konveksi *internal flow* ( $h_{in}$ )

$$h_{in} = \frac{Nu_D \times k}{D_{in}}$$

$$h_{in} = \frac{165,362 \times 0,024423 \frac{W}{m \cdot K}}{0,0131 \text{ m}}$$

$$h_{in} = 308,293 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

#### 4.2.8 Menghitung Overall Heat Transfer Coefficient (U)

Dengan mengabaikan faktor pengotor pada dan mengabaikan perpindahan panas secara konduksi pada tube, Nilai Overall heat transfer coefficient (U) didapatkan dengan sesuai persamaan 2.18 sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{308,293 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{1}{379,837 \frac{W}{m^2 \cdot K}}}$$

$$U = 170,173 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

#### 4.2.9 Menghitung Panjang Pipa Heat Exchanger

$$L = \frac{q}{U \pi D_i \Delta T_{lm}}$$

$$L = \frac{350 \text{ W}}{170,173 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times \pi \times 0,0131 \text{ m} \times 19,80^\circ C}$$

$$L = 2,532 \text{ m}$$

### 4.3 Data Hasil Percobaan

Pengambilan data pada studi eksperimen ini dilakukan sebanyak 5 (lima) kali untuk masing-masing variasi berupa variasi putaran kompresor 3000 rpm, 2700 rpm, 2400 rpm, 2100 rpm, dan 1800 rpm serta beban berupa kecepatan blower pada evaporator

yang disetting *low*, *medium* dan *high*. Pengambilan data dilakukan setelah sistem steady dengan interval waktu 5 menit. Refrigeran yang digunakan dalam studi eksperimen ini adalah Musicool 22. Data hasil percobaan dilampirkan pada lampiran A.2.

#### 4.4 Contoh Perhitungan

Berdasarkan skema serta titik pengukuran seperti pada gambar 3.19 didapatkan data untuk kecepatan putaran kompresor 2400 rpm serta kecepatan *fan* evaporator medium yang telah dirata-rata akan dijadikan sebagai contoh perhitungan guna mengevaluasi sistem yang telah dimodifikasi dalam studi eksperimen ini. Berikut data yang akan dievaluasi:

- Flowrate refrigeran ( $AV_{ref}$ ) : 0,011 l/s
- Flowrate air ( $AV_{air}$ ) : 4,9298 cm<sup>3</sup>/s
- Tegangan listrik yang masuk kompresor (V) : 220 Volt
- Arus listrik yang masuk ke kompresor (i) : 1,6 Ampere
- Temperatur refrigeran masuk kompresor ( $T_1$ ) : 21,66 °C
- Temperatur refrigeran keluar kompresor ( $T_2$ ) : 61,82 °C
- Temperatur refrigeran keluar *precooling* ( $T_3$ ) : 38,48 °C
- Temperatur refrigeran keluar *air cooled condensor* ( $T_4$ ): 32,32 °C
- Temperatur refrigeran masuk pipa kapiler 1 ( $T_5$ ): 29,06 °C
- Temperatur refrigeran masuk pipa kapiler 2 ( $T_6$ ): 28,66 °C
- Temperatur refrigeran masuk evaporator 1 ( $T_7$ ): 8,4 °C
- Temperatur refrigeran masuk evaporator 2 ( $T_8$ ): 7,76 °C
- Temperatur refrigeran keluar evaporator 1 ( $T_9$ ): 20,06 °C
- Temperatur refrigeran keluar evaporator 2 ( $T_{10}$ ): 25,36 °C
- Temperatur air masuk *precooling* ( $T_{11}$ ) : 27,86 °C
- Temperatur air keluar *precooling* ( $T_{12}$ ) : 41,3 °C
- Temperatur udara lingkungan ( $T_{13}$ ) : 28,9 °C
- Tekanan refrigeran masuk kompresor ( $P_s$ ) : 66 psig
- Tekanan refrigeran keluar kompresor ( $P_d$ ) : 164,2 psig
- Tekanan refrigeran keluar kondensor (P) : 160 psig

#### 4.4.1 Konversi Satuan Tekanan

Untuk memudahkan dalam mencari properties refrigeran untuk berbagai kondisi dengan menggunakan *software REFPROP* serta menggambar p-h diagram sistem pengkondian udara yang telah dimodifikasi tersebut maka tekanan yang telah didapat dari hasil pengukuran yang memiliki satuan psig harus dikonversi menjadi satuan bar serta tekanan tersebut dalam satuan absolut.

- Tekanan refrigeran masuk kompresor ( $P_s$ ) : 66 psig

$$P_s = \left\{ \left( 66 \text{ psig} \times \frac{6,894757 \times 10^{-2} \text{ bar}}{1 \text{ psig}} \right) + 1,01325 \text{ bar} \right\}$$

$$P_s = 5,56378962 \text{ bar (abs)}$$

- Tekanan refrigeran keluar kompresor ( $P_d$ ) : 175 psig

$$P_d = \left\{ \left( 164,2 \text{ psig} \times \frac{6,894757 \times 10^{-2} \text{ bar}}{1 \text{ psig}} \right) + 1,01325 \text{ bar} \right\}$$

$$P_d = 12,3344 \text{ bar (abs)}$$

- Tekanan refrigeran keluar kondensor ( $P$ ) : 165,4 psig

$$P = \left\{ \left( 160 \text{ psig} \times \frac{6,894757 \times 10^{-2} \text{ bar}}{1 \text{ psig}} \right) + 1,01325 \text{ bar} \right\}$$

$$P = 12,0448 \text{ bar (abs)}$$

#### 4.4.2 Perhitungan Air

Pada sub bab ini dijabarkan perhitungan pada sisi air yang terjadi pada *heat exchanger* jenis *concentric tube* selama proses *precooling*.

##### 4.4.2.1 Properties Air

Berdasarkan data hasil eksperimen, terdapat 2 titik pengukuran temperatur air masuk dan keluar *heat exchanger* jenis *concentric tube* pada proses *precooling*. *Heat exchanger* seperti yang terlihat pada gambar 3.7. Diperoleh flowrate air, temperatur air masuk ( $T_{11}$ ) dan temperatur air keluar ( $T_{12}$ ) sebagai berikut:

- Temperatur air masuk *precooling* ( $T_{11}$ ) :  $27,86^\circ\text{C} + 273 = 300,86^\circ\text{C}$
- Temperatur air keluar *precooling* ( $T_{12}$ ) :  $41,3^\circ\text{C} + 273 = 314,3$

Untuk mendapatkan *properties* air yang akan digunakan dalam perhitungan, data diatas harus dirata-rata terlebih dahulu. Perhitungan rata-rata temperatur air sebagai berikut:

$$\bar{T}_{air} = \frac{T_{11} + T_{12}}{2} = \frac{(27,86 + 41,3)^{\circ}\text{C}}{2} = 34,58^{\circ}\text{C}$$

Dengan nilai  $\bar{T}_{air} = 34,58^{\circ}\text{C}$  serta tekanan air adalah tekanan atmosfer ( $P_{atm}=1,01325\text{bar}$ ), maka dengan *software REFPROP* didapatkan *properties* sebagai berikut:

- Density air ( $\rho_{air}$ ) :  $994,18 \text{ kg/m}^3$
- Kalor jenis air ( $C_{p,air}$ ) :  $4,1793 \text{ kJ/kg.K}$

#### 4.4.2.2 Energi Panas yang Diserap Air

Setelah didapatkan *properties* air maka dapat dihitung nilai dari energi panas yang diserap oleh air ( $q_c$ ) dengan menggunakan persamaan 2.21.

$$q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Dimana  $\dot{m}_c = AV_{air}\rho_{air}$ , sehingga:

$$q_c = \left( 4,9298 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \left| \frac{10^{-6} \text{m}^3}{1 \text{ cm}^3} \right| \right) \left( 994,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times$$

$$\left( 4,1793 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right) (314,3 - 300,86) \text{K}$$

$$q_c = 275,294 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left| \frac{10^{-3} \text{kW}}{\text{kJ/s}} \right| = 0,275294 \text{ kW}$$

#### 4.4.3 Perhitungan Sisi Refrigeran

Dalam sub bab ini dijabarkan perhitung pada sisi refrigeran meliputi: daya masuk ( $\dot{W}_{in}, \dot{W}_{e1}$  dan  $\dot{W}_{e2}$ ), kerja termodinamika kompresor aktual ( $\dot{W}_c$ ), kerja termodinamika kompresor ideal ( $\dot{W}_{cs}$ ), efisiensi isentropi kompresor ( $\eta_c$ ), energi panas yang dibuang oleh *precooling* ( $\dot{Q}_{precooling}$ ), energi panas yang dibuang oleh *air cooled condensor* ( $\dot{Q}_c$ ), total energi panas yang dibuang oleh kondensor ( $\dot{Q}_{c,total}$ ), energi panas yang diserap oleh evaporator 1 ( $\dot{Q}_{e1}$ ), energi panas yang diserap oleh evaporator



1 ( $\dot{Q}_{e_1}$ ), dan total energi panas yang diserap oleh evaporator ( $\dot{Q}_{e_{total}}$ ).

#### 4.4.3.1 Properties Refrigeran

Untuk menghitung semua yang telah disebutkan sebelumnya, membutuhkan properti refrigeran di berbagai titik yang dengan memasukkan temperatur dan/atau tekanan tekanan yang didapat dari hasil pengukuran pada saat eksperimen ke dalam *software REFPROP. Properties* refrigeran diberbagai titik sebagai berikut:

- Titik 1 (masuk kompresor)

$$T_1 = 21,66 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_s = 5,6327 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_1 = 21,66 \text{ }^\circ\text{C}$  dan nilai  $P_s = 5,6327 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_1 = 609,76 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 2,4663 \text{ kJ/kg.K}$$

- Titik 2 (keluar kompresor)

$$T_2 = 61,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_d = 12,2896 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_2 = 61,82 \text{ }^\circ\text{C}$  dan nilai  $P_d = 12,2896 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_2 = 666,06 \text{ kJ/kg}$$

Untuk mencari nilai  $h_{2s}$  maka dibutuhkan 2 data yaitu:  $P_d = 12,2896 \text{ bar}$  dan  $s_2 = s_1 = 2,4663 \text{ kJ/kg.K}$  dengan asumsi kompresor bekerja secara isentropis (entropi konstan). Kemudian masukkan 2 data tersebut kedalam *software REFPROP* sehingga didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_{2s} = 649,81 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 3 (keluar *precooling*)

$$T_3 = 38,48 \text{ }^\circ\text{C}$$

Untuk mendapatkan nilai dari  $h_3$  maka menggunakan persamaan 2.20 dan 2.21

$$q_c = q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o})$$

Dimana  $C_p \cdot T = h$  serta  $\dot{m}_c = \dot{m}_{ref} = AV_{ref} \rho_{ref}$  maka:

$$q_c = q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) = AV_{ref} \rho_{ref} (h_2 - h_3)$$

$$0,2755285 \text{ kW}$$

$$= \left(0,011 \frac{l}{s}\right) \left| \frac{10^{-3} m^3}{1 l} \right| \left(480,82 \frac{kg}{m^3}\right) \left(666,06 \frac{kJ}{kg} - h_3\right)$$

$$h_3 = 614,0117 \frac{kJ}{kg}$$

- Titik 4 (keluar *air cooled condensor*)

$$T_4 = 32,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 12,04486 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_4 = 32,32 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan nilai  $P = 12,04486 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_4 = 285,28 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho = 480,82 \text{ kg/m}^3$$

- Titik 5 (masuk pipa kapiler 1)

$$T_5 = 29,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 12,04486 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_5 = 29,06 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan nilai  $P = 12,04486 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_5 = 276,22 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 6 (masuk pipa kapiler 2)

$$T_6 = 28,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 12,04486 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_6 = 28,66 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan nilai  $P = 12,04486 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_6 = 275,11 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 7 (masuk evaporator 1)

$$T_7 = 8,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Untuk mendapatkan *properties* pada titik 7 harus menggunakan persamaan 2.8 yaitu  $h_5 = h_7$  dengan asumsi proses 5-7 proses isoentalpi (entalpi tetap) selama melewati pipa kapiler. Sehingga nilai  $h_7$  adalah:

$$h_7 = h_5 = 276,22 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 8 (masuk evaporator 2)

$$T_8 = 6,52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Untuk mendapatkan *properties* pada titik 7 harus menggunakan persamaan 2.9 yaitu  $h_6 = h_8$  dengan asumsi proses 5-7 proses isoentalpi (entalpi tetap) selama melewati pipa kapiler. Sehingga nilai  $h_7$  adalah:

$$h_8 = h_6 = 275,11 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 9 (keluar evaporator 1)

$$T_9 = 20,06 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_s = 5,6327 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_9 = 20,06 \text{ }^\circ\text{C}$  dan nilai  $P_s = 5,6327 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_9 = 606,87 \text{ kJ/kg}$$

- Titik 10 (keluar evaporator 2)

$$T_{10} = 25,36 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_s = 5,6327 \text{ bar}$$

Dengan nilai  $T_{10} = 25,36 \text{ }^\circ\text{C}$  dan nilai  $P_s = 5,6327 \text{ bar}$ , maka didapatkan *properties* sebagai berikut:

$$h_{10} = 616,47 \text{ kJ/kg}$$

#### 4.4.3.2 Laju Aliran Massa Refrigeran

Pada siste, pemgkondisian udara yang telah dimodifikasi ini diasumsikan *steady flow* sehingga laju aliran massa refrigeran selalu konstan. Untuk mendapatkan laju aliran massa refrigeran dapat menggunakan rumus:

$$\dot{m} = \rho \cdot VA$$

Dengan nila massa jenis refrigeran ( $\rho$ ) didapat dari *properties* pada titik 4 dimana alat ukur flow refrigeran terpasang. Dengan nilai  $AV_{\text{ref}} = 0,011 \text{ l/s}$  dan  $\rho = 480,82 \text{ kg/m}^3$ , maka didapatkan nilai laju aliran massa refrigeran:

$$\dot{m} = 480,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,011 \frac{\text{l}}{\text{s}} \times \frac{1}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{l}}$$

$$\dot{m} = 0,005289 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 4.4.3.3 Daya Masuk

Daya yang masuk kedalam sistem terbagi menjadi 2 macam yaitu daya yang menggerakkan kompresor dan blower

kondensor ( $\dot{W}_{in}$ ) serta daya yang menggerakkan blower evaporator 1 ( $\dot{W}_{e1}$ ) dan blower evaporator 2 ( $\dot{W}_{e2}$ ). Besaran daya yang menggerakkan kompresor dan blower kondensor ( $\dot{W}_{in}$ ) dapat dihitung dengan persamaan 2.3.

$$\dot{W}_{in} = V I \cos \phi$$

$$\dot{W}_{in} = (220 \text{ Volt})(1,6 \text{ Ampere})(0,953)$$

$$\dot{W}_{in} = 0,335456 \text{ kW}$$

Sedangkan untuk besaran d Daya penggerak *fan* evaporator 1 ( $\dot{W}_{e1}$ ) dan *fan* evaporator 2 ( $\dot{W}_{e2}$ ) didapat dari spesifikasi alat yaitu:

- Daya penggerak *fan* evaporator 1 ( $\dot{W}_{e1}$ ) = 0,035 kW
- Daya penggerak *fan* evaporator 2 ( $\dot{W}_{e2}$ ) = 0,035 kW

Untuk daya total penggerak *fan* evaporator adalah penjumlahan antara *fan* evaporator 1 ( $\dot{W}_{e1}$ ) dan *fan* evaporator 2 ( $\dot{W}_{e2}$ ).

$$\dot{W}_e = \dot{W}_{e1} + \dot{W}_{e2}$$

$$\dot{W}_e = 0,035 \text{ kW} + 0,035 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_e = 0,07 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.4 Kerja Termodinamika Kompresor Aktual ( $\dot{W}_c$ )

Kerja termodinamika kompresor aktual adalah kerja nyata yang diberikan kompresor ke refrigeran. kerja termodinamika kompresor aktual ( $\dot{W}_c$ ) didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.2.

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Dengan  $\dot{m} = 0,005289 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ,  $h_2 = 666,06 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_1 = 609,76 \text{ kJ/kg}$  sehingga didapatkan nilai

$$\dot{W}_c = 0,005289 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 666,06 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 609,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left| \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{kJ}} \right|$$

$$\dot{W}_c = 0,2977718 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.5 Kerja Termodinamika Kompresor Ideal ( $\dot{W}_{cs}$ )

Kerja termodinamika kompresor ideal adalah kerja ideal yang diberikan kompresor ke refrigeran, dimana kompresor bekerja secara isentropis (entropi konstan). kerja termodinamika

kompresor ideal ( $\dot{W}_c$ ) didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$\dot{W}_{cs} = \dot{m}(h_{2s} - h_1)$$

Dengan  $\dot{m} = 0,005289 \frac{kg}{s}$ ,  $h_{2s} = 649,81 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_1 = 609,76 \text{ kJ/kg}$  sehingga didapatkan nilai

$$\dot{W}_c = 0,005289 \frac{kg}{s} (649,81 \frac{kJ}{kg} - 609,76 \frac{kJ}{kg}) \left| \frac{kW \cdot s}{kJ} \right|$$

$$\dot{W}_c = 0,211825 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.6 Efisiensi Isentropis Kompresor ( $\eta_c$ )

Efisiensi isentropis adalah unjuk kerja isentropi kompresor. Untuk mengetahui efisiensi isentropi kompresor dapat menggunakan persamaan 2.4.

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_{cs}}{\dot{W}_c}$$

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_{cs}}{\dot{W}_c} = \frac{0,211825 \text{ kW}}{0,2977718 \text{ kW}}$$

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_{cs}}{\dot{W}_c} = 0,711368$$

$$\eta_c \approx 71,14 \%$$

#### 4.4.3.7 Kapasitas *Precooling* ( $\dot{Q}_{precooling}$ )

Besarkanya kapasitas *precooling* atau besarnya energi panas yang dibuang oleh *precooling* dapat dihitung dengan cara mengalikan laju aliran massa refrigeran dengan perubahan entalpi seperti persamaan 2.5.

$$\dot{Q}_{precooling} = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Dimana  $\dot{m} = 0,005289 \frac{kg}{s}$ ,  $h_2 = 666,06 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_3 = 614,0117 \text{ kJ/kg}$ , sehingga:

$$\dot{Q}_{precooling} = 0,005289 \frac{kg}{s} \left( 666,06 \frac{kJ}{kg} - 614,0117 \frac{kJ}{kg} \right) \left| \frac{kW \cdot s}{kJ} \right|$$

$$\dot{Q}_{precooling} = 0,2755285 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.8 Kapasitas Kondensor ( $\dot{Q}_c$ )

Besarkanya kapasitas kondensor atau besarnya energi panas yang dibuang oleh kondensor dapat dihitung dengan cara mengalikan laju aliran massa refrigeran dengan perubahan entalpi seperti persamaan 2.6.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

Dimana  $\dot{m} = 0,005289 \frac{kg}{s}$ ,  $h_3 = 614,0117 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_4 = 285,28 \text{ kJ/kg}$ , sehingga:

$$\dot{Q}_c = 0,005289 \frac{kg}{s} \left( 614,0117 \frac{kJ}{kg} - 285,28 \frac{kJ}{kg} \right) \left| \frac{kW \cdot s}{kJ} \right|$$

$$\dot{Q}_c = 1,738668 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.9 Kapasitas Total Kondensor ( $\dot{Q}_{c_{total}}$ )

Besarnya kapasitas total kondensor didapat dengan cara menjumlahkan kapansitas *precooling* dan kapasitas kondensor seperti pada persamaan 2.7.

$$\dot{Q}_{c_{total}} = \dot{Q}_{precooling} + \dot{Q}_c$$

Dimana  $\dot{Q}_{precooling} = 0,2755285 \text{ kW}$  dan  $\dot{Q}_c = 1,738668 \text{ kW}$ , sehingga:

$$\dot{Q}_{c_{total}} = 0,2755285 \text{ kW} + 1,738668 \text{ kW} = 2,013953 \text{ kW}$$

#### 4.4.3.10 Kapasitas Evaporator 1 ( $\dot{Q}_{e_1}$ )

Kapasitas evaporator 1 adalah energi panas yang diserap dari ruangan oleh refrigeran pada evaporator 2. Besarnya nilai kapasitas evaporator 1 didapat dengan cara mengalikan laju aliran massa yang melewati evaporator 1 dengan peruban entalpi

refrigeran seperti pada persamaan 2.10. Besarnya laju aliran massa yang melewati evaporator 1 adalah setengah dari laju aliran massa yang melewati kondensor.

$$\dot{Q}_{e_1} = \frac{\dot{m}}{2} (h_9 - h_7)$$

Dimana  $\dot{m} = 0,005289 \frac{kg}{s}$ ,  $h_9 = 606,87 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_7 = 276,22 \text{ kJ/kg}$ , sehingga:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{e_1} &= \frac{0,005289 \frac{kg}{s}}{2} (606,87 \text{ kJ/kg} - 276,22 \text{ kJ/kg}) \left| \frac{kW \cdot s}{kJ} \right| \\ \dot{Q}_{e_1} &= 0,874407 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.4.3.11 Kapasitas Evaporator 2 ( $\dot{Q}_{e_2}$ )

Kapasitas evaporator 2 adalah energi panas yang diserap dari ruangan oleh refrigeran pada evaporator 2. Besarnya nilai kapasitas evaporator 2 didapat dengan cara mengalikan laju aliran massa yang melewati evaporator 2 dengan perubahan entalpi refrigeran seperti pada persamaan 2.11. Besarnya laju aliran massa yang melewati evaporator 1 adalah setengah dari laju aliran massa yang melewati kondensor.

$$\dot{Q}_{e_2} = \frac{\dot{m}}{2} (h_{10} - h_8)$$

Dimana  $\dot{m} = 0,005289 \frac{kg}{s}$ ,  $h_{10} = 616,47 \text{ kJ/kg}$  dan  $h_8 = 275,11 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{e_2} &= \frac{0,005289 \frac{kg}{s}}{2} (616,47 \text{ kJ/kg} - 275,11 \text{ kJ/kg}) \left| \frac{kW \cdot s}{kJ} \right| \\ \dot{Q}_{e_2} &= 0,90273 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.4.3.12 Kapasitas Total Evaporator ( $\dot{Q}_{e_{total}}$ )

Kapasitas total evaporator adalah total energi panas yang diserap dari ruangan oleh evaporator 1 dan evaporator 2. Besarnya nilai kapasitas total evaporator didapat dengan cara menjumlahkan

kapasitas evaporator 1 dengan kapasitas evaporator 2 seperti persamaa 2.12.

$$\dot{Q}_{e_{total}} = \dot{Q}_{e_1} + \dot{Q}_{e_2}$$

Dimana  $\dot{Q}_{e_1} = 0,874407 \text{ kW}$  dan  $\dot{Q}_{e_2} = 0,90273 \text{ kW}$ , sehingga:  
 $\dot{Q}_{e_{total}} = 0,874407 \text{ kW} + 0,90273 \text{ kW} = 1,777137 \text{ kW}$

#### 4.4.4 Perhitungan Perhitungan Performansi Sistem Pengkondisian Udara

Dalam sub bab ini dijabarkan perhitung performa dari sistem pengkondisian udara, meliputi: COP thermodinamika ( $COP_{thermal}$ ), COP Elektrik ( $COP_{elektrik}$ ) dan Rasio Pelepasan Kalor (HRR).

##### 4.4.4.1 COP Thermodinamika ( $COP_{thermal}$ )

COP adalah unjuk kerja sistem refrigerasi. Nilai COP sistem pengkondisian udara yang dihitung pada penelitian ini adalah nilai COP thermodinamika yang diperoleh dengan membagi antara panas total yang diserap oleh refrigeran pada kedua evaporator ( $\dot{Q}_{e_{total}}$ ) dengan kerja nyata kompresor total pada sistem pengkondisian udara sesuai dengan perumusan 2.17.

$$COP_{thermal} = \frac{\dot{Q}_{e_{total}}}{\dot{W}_c}$$

Dimana  $\dot{Q}_{e_{total}} = 1,777137 \text{ kW}$  dan  $\dot{W}_c = 0,2977718 \text{ kW}$ , sehingga:

$$COP = \frac{1,777137 \text{ kW}}{0,2977718 \text{ kW}}$$

$$COP = 5,968117$$

##### 4.4.4.2 COP Elektrik ( $COP_{elektrik}$ )

Nilai COP elektrik sistem pengkondisian udara yang dihitung pada penelitian ini adalah COP elektrik yang diperoleh dengan membagi panas total yang diserap oleh refrigeran pada kedua evaporator ( $\dot{Q}_{e_{total}}$ ) dengan total daya input elektrik yaitu



dari daya input kompresor dan daya input evaporator sesuai dengan perumusan 2.18.

$$COP_{elektrik} = \frac{\dot{Q}_{e_{total}}}{\dot{W}_{in} + \dot{W}_e}$$

Dimana  $\dot{Q}_{e_{total}} = 1,777137 \text{ kW}$  dan  $\dot{W}_{in} = 0,335456 \text{ kW}$  dan  $\dot{W}_e = 0,07 \text{ kW}$  sehingga:

$$COP_{elektrik} = \frac{1,777137}{0,335456 \text{ kW} + 0,07 \text{ kW}}$$

$$COP_{elektrik} = 4,383058$$

#### 4.4.4.3 Rasio Pelepasan Kalor (HRR)

Rasio pelepasan kalor atau heat rejection ratio adalah perbandingan antara panas yang dibuang oleh sistem dengan panas yang diserap oleh sistem. Dalam hal ini, panas yang dibuang oleh kondensor dan yang diserap oleh evaporator. Nilai dari *heat rejection ratio* diperoleh dengan membandingkan nilai kapasitas total kondensor dengan nilai kapasitas total evaporator sesuai dengan persamaan 2.19.

$$HRR = \frac{\dot{Q}_{c_{total}}}{\dot{Q}_{e_{total}}}$$

Dimana  $\dot{Q}_{c_{total}} = 2,013953 \text{ kW}$  dan  $\dot{Q}_{e_{total}} = 1,777137 \text{ kW}$ , sehingga:

$$HRR = \frac{2,013953 \text{ kW}}{1,777137 \text{ kW}}$$

$$HRR = 1,133257$$

#### 4.4.5 Perhitungan Performansi Heat Exchanger

Untuk mengevaluasi performansi *heat exchanger* tipe *concentric tube* digunakan metode *Number of Transfer Units* (NTU). Untuk mengetahui performansi *heat exchanger* maka dapat digunakan *Effectiveness* dari *heat exchanger* itu sendiri. Untuk mencari nilai tersebut maka harus diketahui nilai perpindahan kalor maksimum ( $q_{\max}$ ) dari *heat exchanger*.

Keterangan fluida :

1. Fluida panas (*hot*) : *Musicool-22*
2. Fluida dingin (*cold*) : air

Berikut ini adalah data temperatur yang didapatkan dari hasil pengukuran pada sistem modifikasi pengkondisian udara dengan menggunakan *heat exchanger* tipe *concentric tube* :

- $T_{hi} = T_2 = 61,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{ho} = T_3 = 38,48 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{ci} = T_{11} = 29,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{co} = T_{12} = 45,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 4.4.5.1 Menghitung $C_h$ (MC-22)

Data pengukuran dari sisi refrigeran yang mengalir melalui *concentric tube* dengan temperatur masuk *precooling*  $61,82 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dan temperatur keluar *precooling*  $38,48 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan masuk *precooling*  $12,3898 \text{ Bar}$ , maka  $\bar{T}_h = 50,15^{\circ}\text{C}$  sehingga didapatkan  $C_p_h = 2,1122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ .

$$C_h = \dot{m}_h \times C_p_h$$

Dengan  $\dot{m}_h = \dot{m}$  dan  $C_p_h = 2,1122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ , maka:

$$C_h = 0,005289 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2,1122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$C_h = 0,011171 \frac{\text{kJ}}{\text{s.K}}$$

#### 4.4.5.2 Menghitung $C_c$ (water)

Data pengukuran pada fluida pendingin (water) yang mengalir melalui *concentric tube* dengan inlet  $27,86 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dan outlet  $41,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan  $1 \text{ atm}$  yaitu  $1.01325 \text{ Bar}$ , maka  $\bar{T}_c = 34,58^{\circ}\text{C}$  sehingga didapatkan  $C_p_c = 4,1793 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ .

$$C_c = \dot{m}_c \times C_p_c$$

Dengan  $\dot{m}_c = AV_{air}\rho_{air}$  dan  $C_p_c = 4,1793 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ , maka:

$$C_c = \left( 4,9298 \frac{cm^3}{s} \left| \frac{10^{-6} m^3}{1 cm^3} \right| \right) \left( 994,18 \frac{kg}{m^3} \right) \times 4,1793 \frac{kJ}{kg.K}$$

$$C_c = 0,020483 \frac{kJ}{s.K}$$

#### 4.4.5.3 Cmin dan Cmax

Dari hasil perhitungan di atas dapat dilihat nilai  $C_c = 0,020483 \frac{kJ}{s.K}$  dan  $C_h = 0,011171 \frac{kJ}{s.K}$ . Dengan nilai  $C_c > C_h$ , maka  $C_{min} = C_h$  sedangkan  $C_{max} = C_c$ .

#### 4.4.5.4 Effectiveness (ε)

Untuk mengetahui performansi suatu *heat exchanger* maka dapat menggunakan perhitungan *effectiveness* seperti pada persamaan 2.35.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

Dimana untuk mendapatka nilai  $q_{max}$  dapat menggunakan persamaan 2.34.

$$q_{max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci})$$

$$q_{max} = 0,011171 \frac{kJ}{s.K} \times (61,82 - 27,86)^\circ C$$

$$q_{max} = 0,379383 kW$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai  $q$

$$q = C_c(T_{co} - T_{ci})$$

$$q = 0,020483 \frac{kJ}{s.K} \times (41,3 - 27,86)^\circ C$$

$$q = 0,275294 kW$$

Maka didapatkan:

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}}$$

$$\varepsilon = \frac{0,275292 kW}{0,379383 kW}$$

$$\varepsilon = 0,725637$$

#### 4.4.5.5 Heat Capacity Ratio (Cr)

*Heat Capacity Ratio* (Cr) adalah rasio dari kapasitas energi panas yang didapat dengan cara membagi kapasitas energi panas minimum dengan kapasitas energi panas maksimum.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Dimana  $C_{min} = C_h$  sedangkan  $C_{max} = C_c$ , sehingga:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_h}{C_c} = \frac{0,011171 \frac{kJ}{s.K}}{0,020483 \frac{kJ}{s.K}} = 0,545397$$

#### 4.4.5.6 Nilai NTU Concentric Tube Heat Exchanger

Untuk nilai NTU sebagai fungsi *Effectiveness* ( $\varepsilon$ ). Untuk *heat exchanger* tipe *concentric tube* dengan nilai  $C_r < 1$ , maka menggunakan persamaan 2.39.

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}$$

Dengan nilai  $C_r = 0,545397$  dan  $\varepsilon = 0,687279$ , maka:

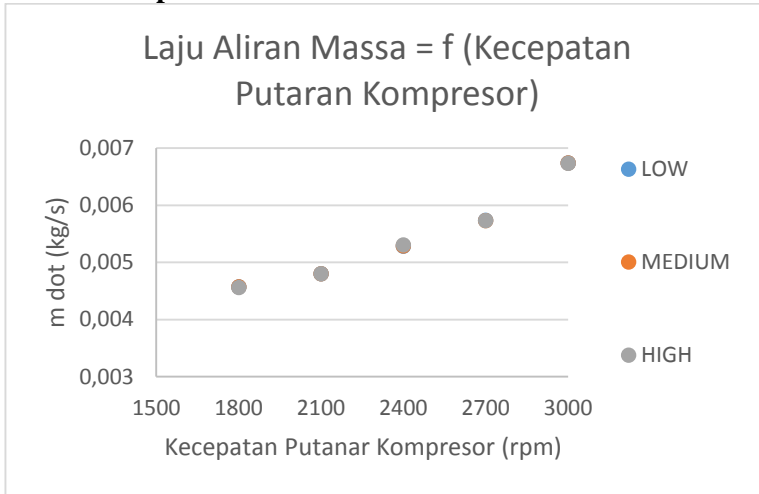
$$NTU = \frac{1}{0,545397 - 1} \ln \frac{0,725637 - 1}{(0,545397)(0,725637) - 1}$$

$$NTU = 1,736719$$

### 4.5 Analisa Grafik

Dalam sub bab ini akan membahas grafik hasil pengolahan data eksperimen. Grafik yang akan dianalisa pada sub bab ini meliputi grafik laju aliran massa, tekanan masuk kompresor, tekanan keluar kompresor, temperatur masuk evaporator, kerja kompresor, efisiensi kompresor, kapasitas total kondensor, kapasitas total evaporator, COP, HRR, effectiveness dan NTU yang semuanya fungsi kecepatan putaran kompresor serta p-h diagram dari sistem untuk masing-masing variasi.

#### 4.5.1 Grafik Laju Aliran Massa Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



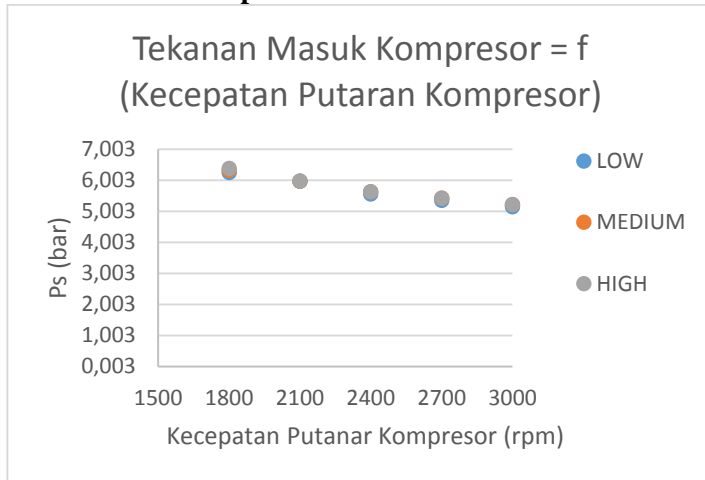
**Gambar 4.1** Grafik laju aliran massa fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan laju aliran massa (*mass flow rate*) refrigeran yang mengalir pada sistem. Grafik tersebut menunjukkan tren yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara laju aliran massa refrigeran untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat laju aliran massa refrigeran pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki laju aliran massa lebih tinggi. Laju aliran massa terendah yaitu 0,004568 kg/s pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan laju aliran massa tertinggi yaitu 0,006737 kg/s pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya laju aliran massa refrigeran pada sistem dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semakin tinggi kecepatan putaran kompresor maka laju aliran masaa semakin naik atau berbanding lurus. Kenaikan tersebut sesuai dengan rumus  $\dot{V} = A_c L n$ , dimana  $n$  adalah kecepatan putaran kompresor. Kenaikan laju aliran massa

berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan putaran kompresor, apabila kecepatan putaran kompresor naik maka laju aliran massa juga naik.

#### 4.5.2 Grafik Tekanan Masuk Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



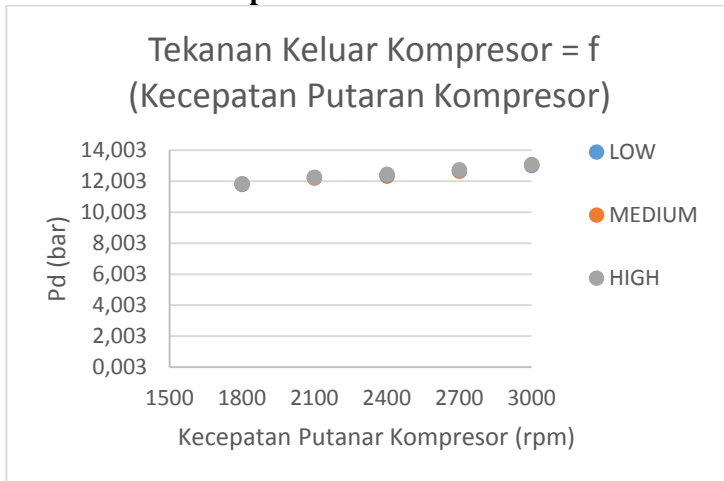
**Gambar 4.2** Grafik tekanan masuk kompresor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan tekanan refrigeran pada sisi masuk (*suction*) kompresor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang menurun. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara tekanan refrigeran pada sisi masuk kompresor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat tekanan refrigeran masuk kompresor pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki tekanan lebih rendah. Tekanan refrigeran masuk kompresor terendah yaitu 5,21 bar pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm sedangkan tekanan refrigeran masuk kompresor tertinggi yaitu 6,32 bar pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm.

Turunnya tekanan refrigeran masuk kompresor pada sistem dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semaik tinggi kecepatan putaran kompresor

maka kecepatan aliran fluida semakin tinggi sehingga head loss saat melalui pipa kapiler dengan panjang yang sama, sesuai dengan persamaa  $h_l = f \frac{L V^2}{D 2g}$ .

#### 4.5.3 Grafik Tekanan Keluar Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor

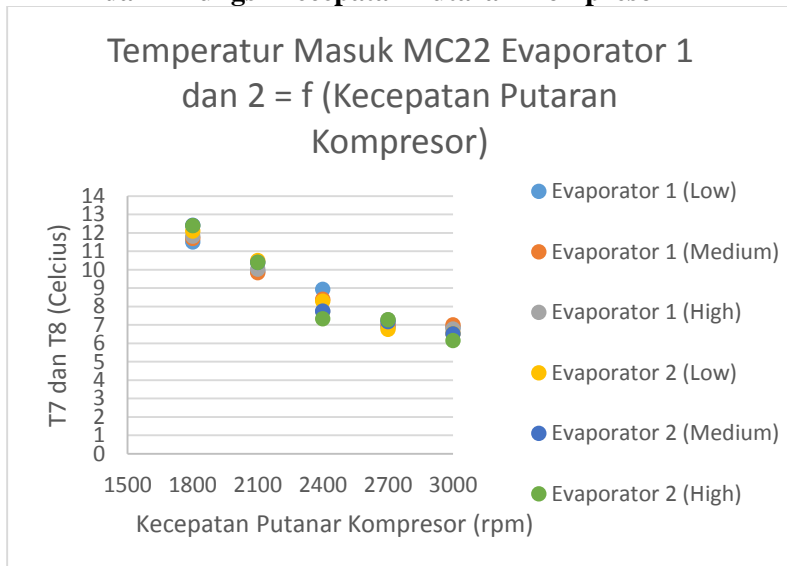


**Gambar 4.3** Grafik tekanan keluar kompresor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan tekanan refrigeran yang keluar (*discharge*) dari kompresor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi. Tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor terendah yaitu 11,824 bar pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor tertinggi yaitu 13,079 bar pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya tekanan yang keluar kompresor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semakin tinggi kecepatan putaran kompresor maka efisiensi volumetris yang semakin menurun, apabila efisiensi volumetris menurun maka *pressure ratio* semakin besar.

#### 4.5.4 Grafik Temperatur Refrigeran Masuk Evaporator 1 dan 2 Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



**Gambar 4.4** Grafik temperatur refrigeran masuk evaporator 1 dan 2

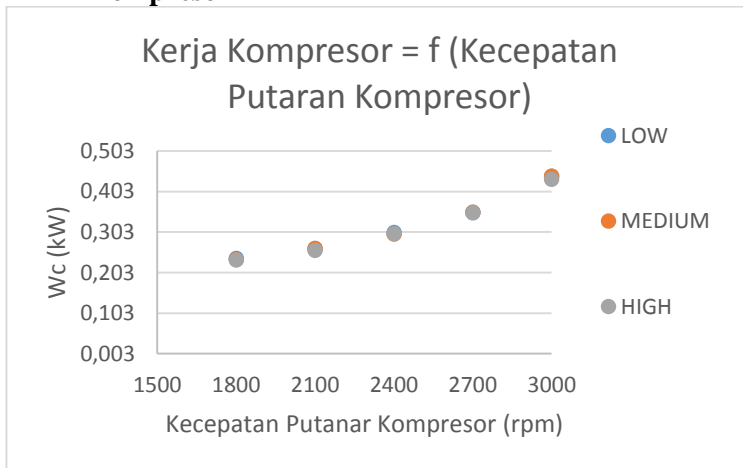
Gambar diatas menunjukkan temperatur refrigeran yang masuk ke evaporator 1 dan 2. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang turun. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara temperatur refrigeran yang masuk ke evaporator 1 dan 2 untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga temperatur refrigeran yang masuk ke evaporator 1 dan 2 pada kecepatan putaran kompresor yang lebih rendah. Temperatur refrigeran yang masuk ke evaporator 1 dan 2 terendah yaitu 6,88 °C dan 6,54 °C pada kecepatan putaran



kompresor 3000 rpm sedangkan temperatur refrigeran yang masuk ke evaporator 1 dan 2 tertinggi yaitu 9,92 °C dan 10,5 °C pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm.

Turunnya temperatur refrigeran yang masuk evaporator berbanding lurus dengan penurunan tekanan refrigeran akibat melewati pipa kapiler. Penurunan temperatur refrigeran yang masuk evaporator dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semaik tinggi kecepatan putaran kompresor maka kecepatan aliran fluida semakin tinggi sehingga head loss saat melalui pipa kapiler dengan panjang yang sama, sesuai dengan persamaa  $h_l = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$ .

#### 4.5.5 Grafik Kerja Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



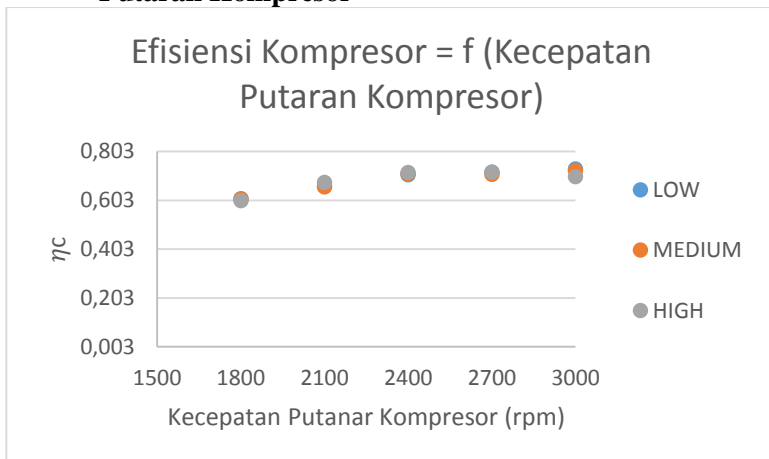
**Gambar 4.5** Grafik kerja kompresor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan kerja kompresor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara kerja kompresor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat kerja kompresor pada kecepatan putaran

kompresor yang lebih tinggi memiliki kerja kompresor lebih tinggi. Kerja kompresor terendah yaitu 0,24 kW pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan kerja kompresor tertinggi yaitu 0,44 kW pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya kerja kompresor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan kenaikan kecepatan putaran kompresor mengakibatkan bertambahnya laju aliran massa sehingga naiknya kerja kompresor sesuai persamaan 2.2.

#### 4.5.6 Grafik Efisiensi Kompresor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



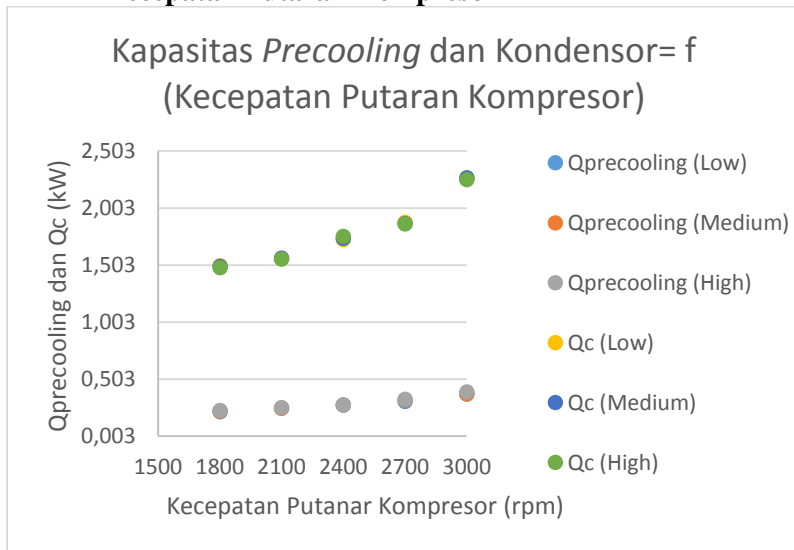
**Gambar 4.6** Grafik efisiensi kompresor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan efisiensi kompresor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara efisiensi kompresor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga efisiensi kompresor pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki efisiensi kompresor yang lebih tinggi. Efisiensi kompresor terendah yaitu 0,61 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan efisiensi

kompresor tertinggi yaitu 0,73 pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya efisiensi kompresor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan kenaikan kerja kompresor aktual (politropik) tidak sebanding dengan kenaikan kerja kompresor ideal (isentropik) sesuai dengan persamaan 2.4.

#### 4.5.7 Grafik Kapasitas *Precooling* dan Kondensor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



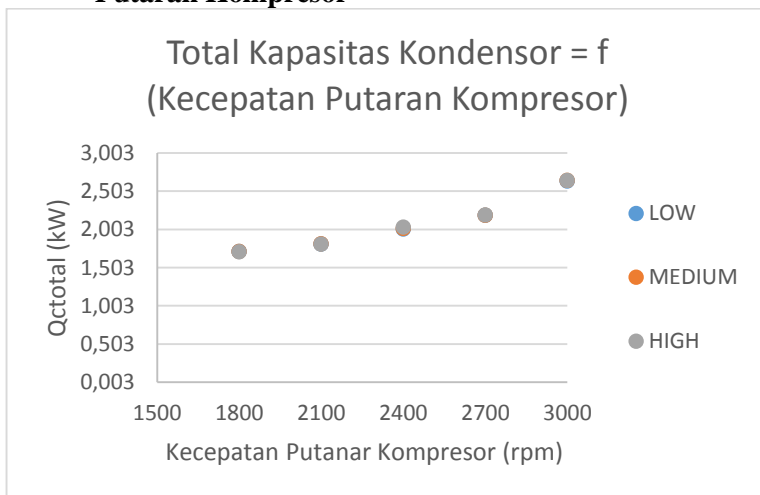
**Gambar 4.7** Grafik kapasitas *precooling* dan kondensor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan kapasitas *precooling* dan kondensor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara kapasitas *precooling* dan kondensor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat kapasitas *precooling* dan kondensor pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki kapasitas *precooling* dan

kondensor lebih tinggi. Kapasitas *precooling* dan kondensor terendah yaitu 0,22 kW dan 1,5 kW pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan Kapasitas *precooling* dan kondensor tertinggi yaitu 0,37 kW dan 2,26 kW pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya Kapasitas *precooling* dan kondensor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan kenaikan kecepatan putaran kompresor mengakibatkan bertambahnya laju aliran massa sehingga naiknya kapasitas *precooling* sesuai persamaan 2.5 dan kenaikan kapasitas kondensor sesuai persamaan 2.6.

#### 4.5.8 Grafik Total Kapasitas Kondensor Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



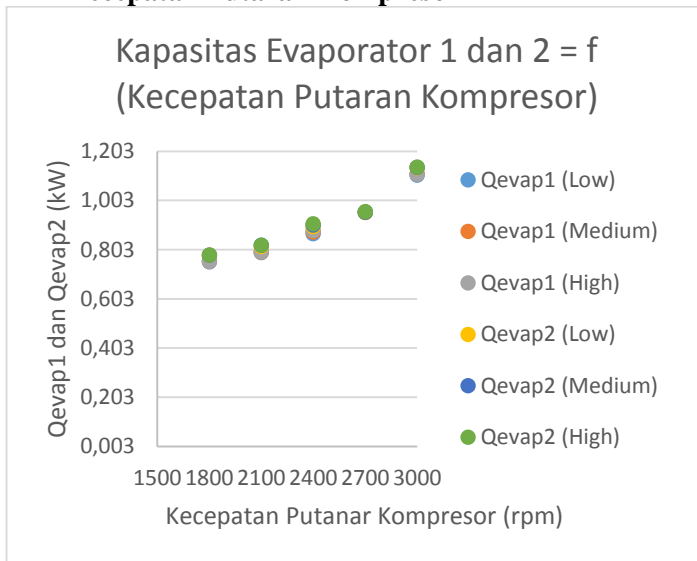
**Gambar 4.8** Grafik total kapasitas kondensor fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan total kapasitas kondensor. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara total kapasitas kondensor untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat total kapasitas kondensor

pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki total kapasitas kondensor lebih tinggi. total kapasitas kondensor terendah yaitu 1,71 kW pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan total kapasitas kondensor tertinggi yaitu 2,63 kW pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya kapasitas total kondensor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan kenaikan kecepatan putaran kompresor mengakibatkan bertambahnya laju aliran massa sehingga naiknya kapasitas total kondensor sesuai persamaan 2.7.

#### 4.5.9 Grafik Kapasitas Evaporator 1 Dan 2 Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



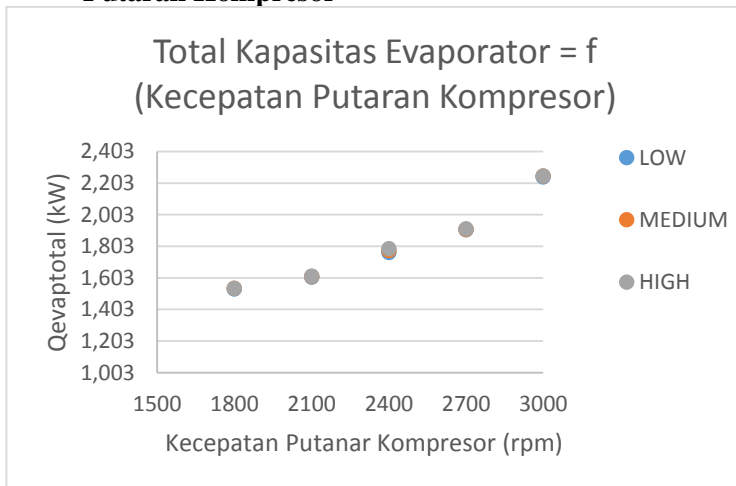
**Gambar 4.9** Grafik kapasitas evaporator 1 dan 2 fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan kapasitas evaporator 1 dan 2. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara kapasitas evaporator 1 dan 2 untuk kecepatan blower evaporator low,

medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat kapasitas evaporator 1 dan 2 pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki kapasitas evaporator 1 dan 2 lebih tinggi. kapasitas evaporator 1 dan 2 terendah yaitu 0,75 kW dan 0,78 kW pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan kapasitas evaporator 1 dan 2 tertinggi yaitu 1,11 kW dan 1,14 kW pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Kenaikan tersebut sesuai karena semakin tinggi kecepatan putaran kompresor kapasitas evaporator 1 dan 2 berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan kompresor. Kenaikan kecepatan putaran kompresor berdampak pada kenaikan laju aliran massa refrigeran sehingga kapasitas evaporator 1 dan 2 sesuai dengan persamaan 2.10 dan 2.11.

#### 4.5.10 Grafik Total Kapasitas Evaporator Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



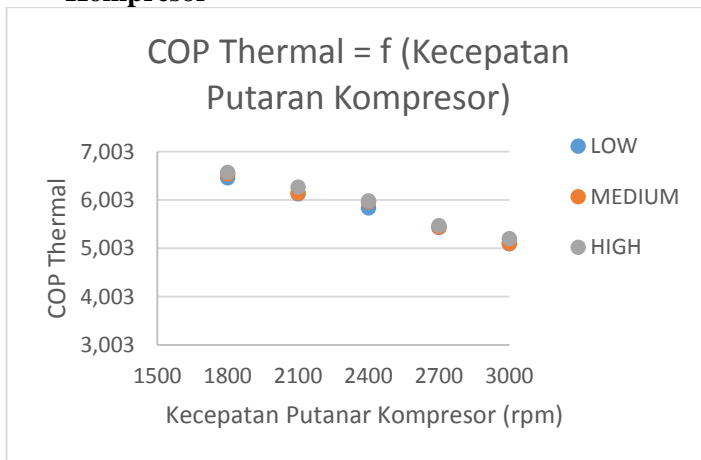
**Gambar 4.10** Grafik total kapasitas evaporator fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan total kapasitas evaporator. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara total kapasitas

evaporator untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat total kapasitas evaporator pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki total kapasitas evaporator lebih tinggi. kapasitas evaporator 1 dan 2 terendah yaitu 1,53 kW pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan total kapasitas evaporator tertinggi yaitu 2,25 kW pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya kapasitas total kondensor dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan kenaikan kecepatan putaran kompresor mengakibatkan bertambahnya laju aliran massa sehingga naiknya kapasitas total kondensor sesuai persamaan 2.12.

#### 4.5.11 Grafik COP Thermal Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



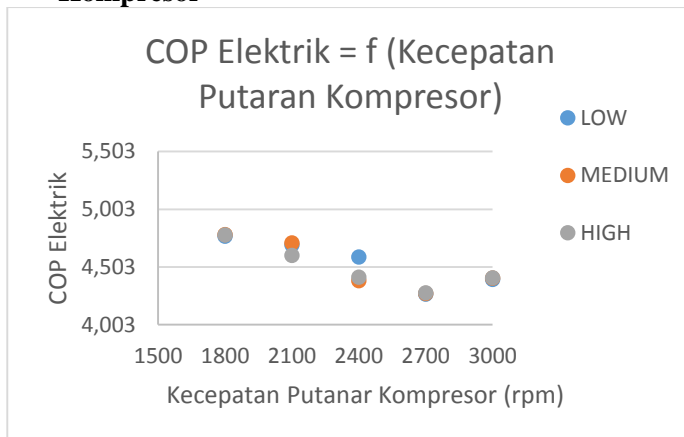
**Gambar 4.11** Grafik COP thermal fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan COP thermal. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang menurun. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara COP thermal untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat COP thermal pada kecepatan putaran

kompresor yang lebih tinggi memiliki nilai yang lebih kecil. COP thermal terendah yaitu 5,1 pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm sedangkan COP thermal tertinggi yaitu 6,54 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm.

Penurunan COP thermal dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semakin tinggi kecepatan putaran kompresor. Penurunan tersebut diakibatkan kenaikan total kapasitas evaporator tidak sebanding dengan kerja kompresor sesuai dengan persamaan 2.17.

#### 4.5.12 Grafik COP Elektrik Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



**Gambar 4.12** Grafik COP elektrik fungsi kecepatan putaran kompresor

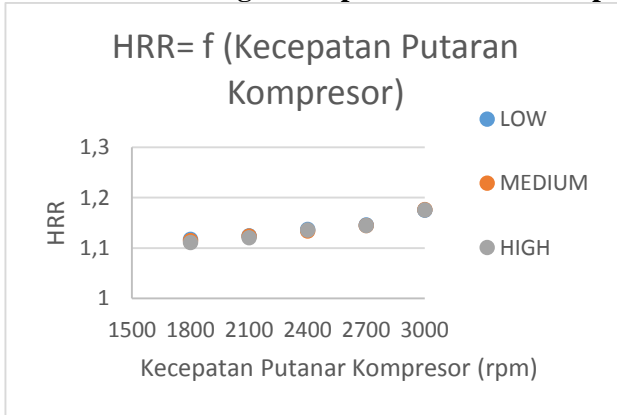
Gambar diatas menunjukkan COP elektrik. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang menurun. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara COP elektrik untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga terlihat COP elektrik pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki nilai yang lebih kecil. COP elektrik terendah yaitu 4,27 pada kecepatan putaran kompresor



2700 rpm sedangkan COP elektrik tertinggi yaitu 4,78 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm.

Penurunan COP elektrik dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semakin tinggi kecepatan putaran kompresor. Penurunan tersebut diakibatkan kenaikan total kapasitas evaporator tidak sebanding dengan daya yang masuk ke sistem sesuai dengan persamaan 2.18.

#### 4.5.13 Grafik HRR Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



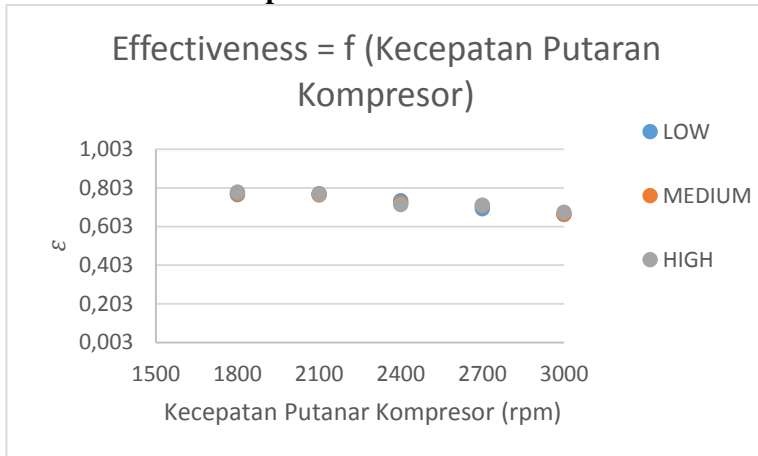
**Gambar 4.13** Grafik HRR fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan HRR. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang naik. Dari gambar grafik terlihat bahwa tidak ada perbedaan antara HRR untuk kecepatan blower evaporator low, medium dan high. Dari gambar grafik juga HRR pada kecepatan putaran kompresor yang lebih tinggi memiliki nilai yang lebih tinggi. HRR dari kompresor terendah yaitu 1,11 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor tertinggi yaitu 1,175 pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Naiknya HRR dari kecepatan putaran kompresor rendah hingga putaran maksimum disebabkan semakin tinggi kecepatan putaran. Kenaikan tersebut sesuai karena kenaikan total kapasitas

kondensor lebih tinggi dibandingkan kenaikan total kapasitas evaporator yang sesuai persamaan 2.19.

#### 4.5.14 Grafik *Effectiveness Heat Exchanger* Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor

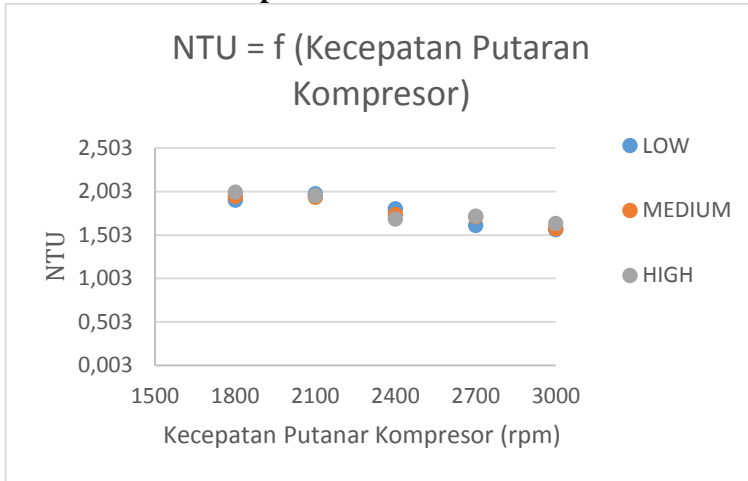


**Gambar 4.14** Grafik *effectiveness heat exchanger* fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan *effectiveness heat exchanger*. Grafik tersebut menunjukkan tren grafik yang menurun. Dari gambar grafik juga terlihat *effectiveness heat exchanger* pada kecepatan putaran kompresor rendah memiliki nilai *effectiveness heat exchanger* yang lebih yang tinggi, semakin bertambah cepatnya kecepatan putaran kompresor maka nilai *effectiveness heat exchanger* semakin menurun. *Effectiveness heat exchanger* terendah yaitu 0,6673 pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm sedangkan *effectiveness heat exchanger* tertinggi yaitu 0,7739 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm (low).

Penurunan tersebut diakibatkan kapasitas *precooling* tidak sebanding dengan kenaikan kapasitas maksimum sesuai dengan persamaan 2.35.

#### 4.5.15 Grafik NTU *Heat Exchanger* Fungsi Kecepatan Putaran Kompresor



**Gambar 4.15** Grafik NTU *heat exchanger* fungsi kecepatan putaran kompresor

Gambar diatas menunjukkan NTU *heat exchanger*. Grafik tersebut menunjukkan tren yang naik. Dari gambar grafik juga terlihat NTU *heat exchanger* dari kompresor pada kecepatan putaran kompresor yang rendah memiliki NTU *heat exchanger* yang tinggi, seiring bertambah cepatnya kecepatan putaran kompresor maka nilai NTU *heat exchanger* semakin turun. NTU *heat exchanger* terendah yaitu 1,575 pada kecepatan putaran kompresor 1800 rpm sedangkan tekanan refrigeran yang keluar dari kompresor tertinggi yaitu 1,947 pada kecepatan putaran kompresor 3000 rpm (medium).

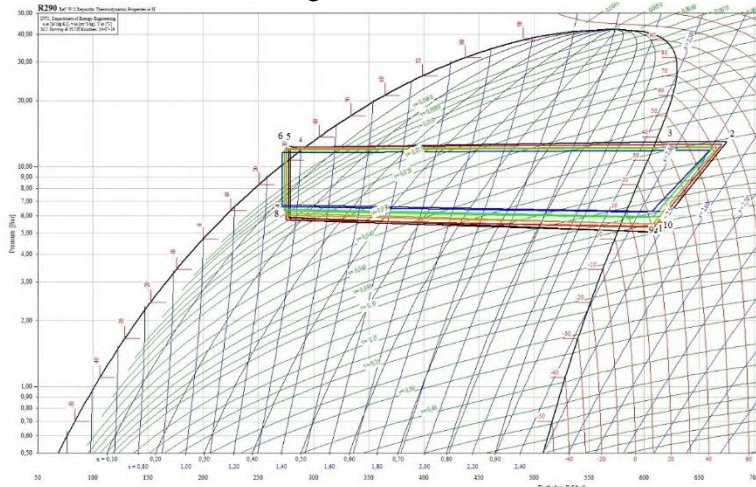
Penurunan nilai NTU *heat exchanger* tersebut diakibatkan oleh nilai *rasio heat capacity* yang sebagai pembagi dalam perhitungan NTU *heat exchanger* sesuai dengan persamaan 2.39.

#### 4.5.16 P-h Diagram Kecepatan Fan Evaporator *Low*

Pada gambar 4.16 p-h diagram kecepatan blower evaporator *low* dibawah membandingkan perbedaan antara sistem

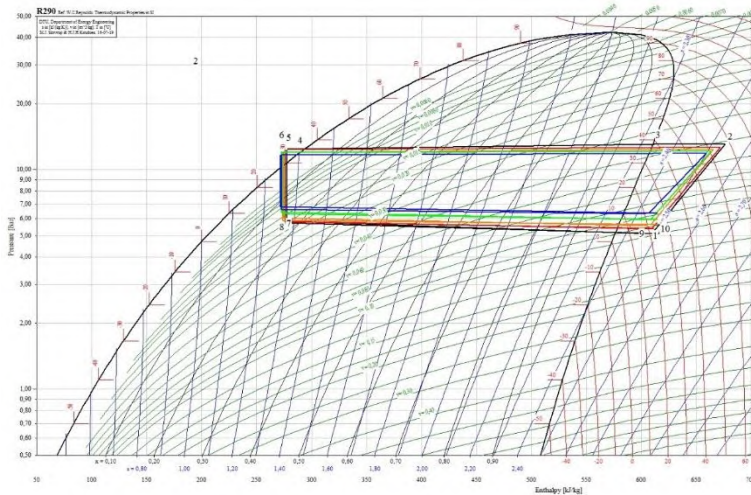
dengan variasi kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, 2700 rpm dan 3000 rpm. Garis warna biru menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, garis warna hijau menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2100 rpm, garis warna orange menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2400 rpm, garis warna merah menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2700 rpm dan garis warna hitam menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Pada gambar plot terlihat semakin bertambah cepat kecepatan putaran kompresor maka proses kompresi semakin panjang yang berarti *pressure ratio* semakin tinggi dan refrigeran keluaran kompresor semakin *superheated* serta proses ekspansi semakin panjang pula sehingga tekanan dan temperatur pada masuk evaporator semakin rendah. Bertambah cepat kecepatan kompresor juga akan mengakibatkan laju aliran massa refrigeran semakin meningkat yang berakibat kapasitas evaporasi, kapasitas kondensasi semakin meningkat.



**Gambar 4.16** p-h diagram kecepatan *fan* evaporator *low*

#### 4.5.17 P-h Diagram Kecepatan *Fan* Evaporator *Medium*



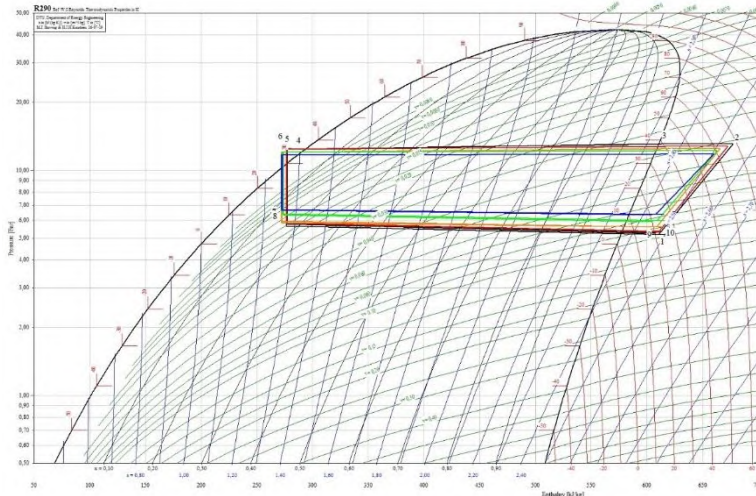
**Gambar 4.17** p-h diagram kecepatan *fan* evaporator *medium*

Pada gambar 4.16 p-h diagram kecepatan blower evaporator *low* dibawah membandingkan perbedaan antara sistem dengan variasi kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, 2700 rpm dan 3000 rpm. Garis warna biru menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, garis warna hijau menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2100 rpm, garis warna orange menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2400 rpm, garis warna merah menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2700 rpm dan garis warna hitam menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Pada gambar plot terlihat semakin bertambah cepat kecepatan putaran kompresor maka proses kompresi semakin panjang yang berarti *pressure ratio* semakin tinggi dan refrigeran keluaran kompresor semakin *superheated* serta proses ekspansi semakin panjang pula sehingga tekanan dan temperatur pada masuk evaporator semakin rendah. Bertambah cepat kecepatan kompresor juga akan mengakibatkan laju aliran massa refrigeran

semakin meningkat yang berakibat kapasitas evaporasi, kapasitas kondensasi semakin meningkat.

#### 4.5.18 P-h Diagram Kecepatan *Fan* Evaporator *High*



**Gambar 4.18** p-h diagram kecepatan *fan* evaporator *high*

Pada gambar 4.16 p-h diagram kecepatan blower evaporator *low* dibawah membandingkan perbedaan antara sistem dengan variasi kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, 2700 rpm dan 3000 rpm. Garis warna biru menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, garis warna hijau menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2100 rpm, garis warna orange menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2400 rpm, garis warna merah menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 2700 rpm dan garis warna hitam menunjukkan kurva sistem dengan kecepatan putaran kompresor 3000 rpm.

Pada gambar plot terlihat semakin bertambah cepat kecepatan putaran kompresor maka proses kompresi semakin panjang yang berarti *pressure ratio* semakin tinggi dan refrigeran keluaran kompresor semakin *superheated* serta proses ekspansi

semakin panjang pula sehingga tekanan dan temperatur pada masuk evaporator semakin rendah. Bertambah cepat kecepatan kompresor juga akan mengakibatkan laju aliran massa refrigeran semakin meningkat yang berakibat kapasitas evaporasi, kapasitas kondensasi semakin meningkat.

## LAMPIRAN

### LAMPIRAN A

#### A.1 Data Hasil Eksperimen Kecepatan *Fan* Evaporator *Low*

| L<br>O<br>W | Kecepatan |          |            |          |            |                      | 1     |          | 2     |          | 3     |  |
|-------------|-----------|----------|------------|----------|------------|----------------------|-------|----------|-------|----------|-------|--|
|             | Kompresor | AV (l/s) | i (Ampere) | V (Volt) | cos $\phi$ | AV air               | T1    | Ps       | T2    | Pd       | T3    |  |
|             | (rpm)     |          |            |          |            | (cm <sup>3</sup> /s) | (°C)  | (bar)    | (°C)  | (bar)    | (°C)  |  |
|             | 3000      | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953      | 4,9298               | 21,16 | 5,150104 | 67,36 | 13,01013 | 38,24 |  |
|             | 2700      | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953      | 4,9298               | 21,28 | 5,356947 | 64,72 | 12,66539 | 39,72 |  |
|             | 2400      | 0,011    | 1,5        | 220      | 0,953      | 4,9298               | 21,42 | 5,56379  | 62,1  | 12,33444 | 38,82 |  |
|             | 2100      | 0,01     | 1,3        | 220      | 0,953      | 4,9298               | 22    | 5,977475 | 60,52 | 12,23791 | 36,82 |  |
|             | 1800      | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953      | 4,9298               | 22,08 | 6,253265 | 58,14 | 11,78286 | 34,98 |  |

| L<br>O<br>W | Kecepatan |       | 4         | 5     | 6     | 7     | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|-------------|-----------|-------|-----------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | Kompresor | T4    | P         | T5    | T6    | T7    | T8   | T9    | T10   | T11   | T12   | T13   |
|             | (rpm)     | (°C)  | (bar)     | (°C)  | (°C)  | (°C)  | (°C) | (°C)  | (°C)  | (°C)  | (°C)  | (°C)  |
|             | 3000      | 32,16 | 12,389599 | 29,96 | 30,08 | 6,88  | 6,54 | 19,24 | 24,44 | 28,5  | 46,7  | 28,12 |
|             | 2700      | 34    | 12,320651 | 29,36 | 29,54 | 6,88  | 6,76 | 21,22 | 21,42 | 28,24 | 43,3  | 27,3  |
|             | 2400      | 32,88 | 12,044861 | 29,4  | 29,28 | 8,94  | 8,3  | 19,44 | 25,3  | 28,28 | 41,82 | 29,16 |
|             | 2100      | 32,92 | 12,044861 | 28,82 | 28,7  | 9,92  | 10,5 | 20,04 | 25,54 | 28,64 | 40,8  | 29,32 |
|             | 1800      | 32,24 | 11,631176 | 28,28 | 28,04 | 11,52 | 12,1 | 19,72 | 25,86 | 28,5  | 39,1  | 29,04 |



## A.2 Data Hasil Eksperimen Kecepatan *Fan* Evaporator *Medium*

| M<br>E<br>D<br>U<br>M | Kecepatan          |          |            |          |            |                                | 1          |                         | 2          |                         | 3          |
|-----------------------|--------------------|----------|------------|----------|------------|--------------------------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|
|                       | Kompresor<br>(rpm) | AV (l/s) | i (Ampere) | V (Volt) | cos $\phi$ | AV air<br>(cm <sup>3</sup> /s) | T1<br>(°C) | P <sub>s</sub><br>(bar) | T2<br>(°C) | P <sub>d</sub><br>(bar) | T3<br>(°C) |
| D                     | 3000               | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 21,84      | 5,219052                | 67,94      | 13,07907                | 38,7       |
| I                     | 2700               | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,04      | 5,425894                | 65,26      | 12,66539                | 39,98      |
| U                     | 2400               | 0,011    | 1,6        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 21,66      | 5,632737                | 61,82      | 12,3896                 | 38,48      |
| M                     | 2100               | 0,01     | 1,3        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,18      | 5,977475                | 60,64      | 12,19655                | 37,42      |
|                       | 1800               | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,56      | 6,322213                | 58,26      | 11,82423                | 35,78      |

| M<br>E<br>D<br>U<br>M | Kecepatan          | 4          |            | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10          | 11          | 12          | 13          |
|-----------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | Kompresor<br>(rpm) | T4<br>(°C) | P<br>(bar) | T5<br>(°C) | T6<br>(°C) | T7<br>(°C) | T8<br>(°C) | T9<br>(°C) | T10<br>(°C) | T11<br>(°C) | T12<br>(°C) | T13<br>(°C) |
| D                     | 3000               | 32,08      | 12,417178  | 30         | 30,08      | 7          | 6,52       | 20,2       | 24,58       | 28,94       | 47,28       | 28,26       |
| I                     | 2700               | 34,28      | 12,389599  | 29,58      | 29,8       | 7          | 7,18       | 22,06      | 22,38       | 28,14       | 43,82       | 27,7        |
| U                     | 2400               | 32,32      | 12,044861  | 29,06      | 28,66      | 8,4        | 7,76       | 20,06      | 25,36       | 27,86       | 41,3        | 28,9        |
| M                     | 2100               | 32,8       | 12,044861  | 28,86      | 28,4       | 9,84       | 10,4       | 20,14      | 26,1        | 28,54       | 40,68       | 29,22       |
|                       | 1800               | 32,22      | 11,686334  | 28,36      | 28         | 11,7       | 12,42      | 20,76      | 26,1        | 28,1        | 38,98       | 28,96       |

### A.3 Data Hasil Eksperimen Kecepatan *Fan* Evaporator *High*

|   | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | AV (l/s) | i (Ampere) | V (Volt) | cos $\phi$ | AV air<br>(cm <sup>3</sup> /s) | 1          |             | 2          |             | 3          |
|---|---------------------------------|----------|------------|----------|------------|--------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|   |                                 |          |            |          |            |                                | T1<br>(°C) | Ps<br>(bar) | T2<br>(°C) | Pd<br>(bar) | T3<br>(°C) |
| H | 3000                            | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 21,78      | 5,219052    | 68,46      | 13,07907    | 39,3       |
| I | 2700                            | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,52      | 5,425894    | 65,64      | 12,73434    | 40,18      |
| G | 2400                            | 0,011    | 1,6        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 21,84      | 5,632737    | 62,1       | 12,45855    | 37,78      |
| H | 2100                            | 0,01     | 1,34       | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,64      | 5,977475    | 60,62      | 12,2517     | 35,38      |
|   | 1800                            | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953      | 4,9298                         | 22,98      | 6,39116     | 58,44      | 11,83802    | 36,26      |

|   | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | 4          |            | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10          | 11          | 12          | 13          |
|---|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                                 | T4<br>(°C) | P<br>(bar) | T5<br>(°C) | T6<br>(°C) | T7<br>(°C) | T8<br>(°C) | T9<br>(°C) | T10<br>(°C) | T11<br>(°C) | T12<br>(°C) | T13<br>(°C) |
| H | 3000                            | 32,36      | 12,389599  | 29,98      | 29,98      | 6,78       | 6,16       | 20,26      | 24,9        | 28,38       | 47,48       | 29,44       |
| I | 2700                            | 34,28      | 12,403389  | 29,88      | 29,74      | 7,28       | 7,28       | 22,42      | 22,84       | 28,06       | 43,98       | 27,9        |
| G | 2400                            | 31,6       | 12,044861  | 28,56      | 28,14      | 7,74       | 7,34       | 20,26      | 25,18       | 27,76       | 41,24       | 28,72       |
| H | 2100                            | 32,98      | 12,044861  | 28,86      | 28,46      | 10,04      | 10,4       | 20,48      | 26,2        | 28,24       | 40,56       | 28,98       |
|   | 1800                            | 32,68      | 11,700123  | 28,46      | 28,14      | 11,82      | 12,4       | 21,04      | 26,6        | 27,84       | 38,96       | 28,98       |

# LAMPIRAN B

## B.1 Hasil Perhitungan pada Kecepatan *Fan* Evaporator *Low*

| L<br>O<br>W | Kecepatan |          |            |          |            | 1       |       |         |         |           |  |
|-------------|-----------|----------|------------|----------|------------|---------|-------|---------|---------|-----------|--|
|             | Kompresor | AV (l/S) | i (Ampere) | V (Volt) | cos $\phi$ | AV air  | T1    | Ps      | h1      | s1        |  |
|             | (rpm)     |          |            |          |            | (cm3/s) | (°C)  | (bar)   | (kJ/kg) | (kJ/kg.K) |  |
|             | 3000      | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953      | 4,9298  | 21,16 | 5,1501  | 610,58  | 2,4844    |  |
|             | 2700      | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953      | 4,9298  | 21,28 | 5,35695 | 610,06  | 2,4759    |  |
|             | 2400      | 0,011    | 1,5        | 220      | 0,953      | 4,9298  | 21,42 | 5,56379 | 609,58  | 2,4678    |  |
|             | 2100      | 0,01     | 1,3        | 220      | 0,953      | 4,9298  | 22    | 5,97748 | 609,14  | 2,4542    |  |
|             | 1800      | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953      | 4,9298  | 22,08 | 6,25327 | 608,28  | 2,4437    |  |

| LOW  | Kecepatan | 2       |         |         |         | 3      |         |        | 4      |         |         | 5      |         | 6      |         |
|------|-----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|
|      | Kompresor | T2      | Pd      | h2      | h2s     | T3     | h3      | T4     | P      | h4      | Density | T5     | h5      | T6     | h6      |
|      | (rpm)     | (°C)    | (bar)   | (kJ/kg) | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (bar)  | (kJ/kg) | (kg/m3) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) |
|      | 3000      | 67,36   | 13,0101 | 675,9   | 658,3   | 38,24  | 620,62  | 32,16  | 12,39  | 284,8   | 481,2   | 30     | 278,7   | 30,08  | 279,03  |
|      | 2700      | 64,72   | 12,6654 | 671,33  | 654,09  | 39,72  | 617,57  | 34     | 12,321 | 290     | 478     | 29,4   | 277,04  | 29,54  | 277,54  |
|      | 2400      | 62,1    | 12,3344 | 666,81  | 650,07  | 38,82  | 614,27  | 32,88  | 12,045 | 286,9   | 479,8   | 29,4   | 277,15  | 29,28  | 276,82  |
| 2100 | 60,52     | 12,2379 | 663,8   | 645,23  | 36,82   | 611,88 | 32,92   | 12,045 | 287    | 479,8   | 28,8    | 275,55 | 28,7    | 275,22 |         |
| 1800 | 58,14     | 11,7829 | 660,24  | 639,93  | 34,98   | 612,69 | 32,24   | 11,631 | 285,1  | 480,8   | 28,3    | 274,07 | 28,04   | 273,41 |         |

| L<br>O<br>W | Kecepatan | 7      |         | 8     |         | 9      |         | 10     |         | 11     |         | 12     |         | 13    |
|-------------|-----------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|
|             | Kompresor | T7     | h7      | T8    | h8      | T9     | h9      | T10    | h10     | T11    | h11     | T12    | h12     | T13   |
|             | (rpm)     | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)  | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)  |
|             | 3000      | 6,88   | 278,7   | 6,54  | 279     | 19,24  | 607,14  | 24,44  | 616,46  | 28,5   | 119,55  | 46,7   | 195,62  | 28,12 |
|             | 2700      | 6,88   | 277,04  | 6,76  | 277,5   | 21,22  | 609,95  | 21,42  | 610,31  | 28,24  | 118,47  | 43,3   | 181,41  | 27,3  |
|             | 2400      | 8,94   | 277,15  | 8,3   | 276,8   | 19,44  | 606     | 25,3   | 616,6   | 28,28  | 118,63  | 41,82  | 182,5   | 29,16 |
|             | 2100      | 9,92   | 275,55  | 10,5  | 275,2   | 20,04  | 605,57  | 25,54  | 615,61  | 28,64  | 120,14  | 40,8   | 170,96  | 29,32 |
| 1800        | 11,52     | 274,07 | 12,1    | 273,4 | 19,72   | 603,95 | 25,86   | 615,23 | 28,5    | 119,55 | 39,1    | 163,85 | 29,04   |       |

| L<br>O<br>W | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | m dot<br>MC22<br>(kg/s) | Wc<br>(kW) | Wcs<br>(kW) | Qprecooling<br>(kW) | Qc<br>(kW) | Q Cond<br>Total<br>(kW) | Qe1<br>(kW) | Qe2<br>(kW) | Q Evap<br>Total<br>(kW) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|------------|-------------|---------------------|------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
|             | 3000                            | 0,00674                 | 0,44006607 | 0,3215      | 0,37240381          | 2,262266   | 2,6347                  | 1,10636     | 1,13665     | 2,24301                 |
|             | 2700                            | 0,00574                 | 0,35140796 | 0,2525      | 0,30832914          | 1,878751   | 2,1871                  | 0,95469     | 0,95428     | 1,90897                 |
|             | 2400                            | 0,00528                 | 0,30206738 | 0,2137      | 0,27729401          | 1,728184   | 2,0055                  | 0,86786     | 0,8967      | 1,76456                 |
|             | 2100                            | 0,0048                  | 0,26223682 | 0,1731      | 0,24909023          | 1,558789   | 1,8079                  | 0,79165     | 0,81653     | 1,60818                 |
|             | 1800                            | 0,00457                 | 0,23733743 | 0,1446      | 0,21720702          | 1,496455   | 1,7137                  | 0,7534      | 0,78066     | 1,53406                 |

| L<br>O<br>W | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | We1<br>(kW) | We2<br>(kW) | We<br>Total<br>(kW) | Win<br>(kW) | $\eta_c$ | COP<br>Thermal | COP<br>Elektrik | HRR    | Tm<br>air<br>(°C) | Density<br>air<br>(°C) | Cp<br>air<br>J/kg.K | m dot<br>air<br>(kg/s) | Q<br>air<br>(kW) |
|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|----------|----------------|-----------------|--------|-------------------|------------------------|---------------------|------------------------|------------------|
|             | 3000                            | 0,035       | 0,035       | 0,07                | 0,4403      | 0,731    | 5,097          | 4,396           | 1,1746 | 37,6              | 993,1                  | 4,18                | 0,0049                 | 0,372            |
|             | 2700                            | 0,035       | 0,035       | 0,07                | 0,3774      | 0,719    | 5,4323         | 4,267           | 1,1457 | 35,77             | 993,8                  | 4,18                | 0,0049                 | 0,308            |
|             | 2400                            | 0,035       | 0,035       | 0,07                | 0,3145      | 0,707    | 5,8416         | 4,589           | 1,1365 | 35,05             | 994                    | 4,18                | 0,0049                 | 0,277            |
|             | 2100                            | 0,035       | 0,035       | 0,07                | 0,2726      | 0,66     | 6,1325         | 4,695           | 1,1242 | 34,72             | 994,1                  | 4,18                | 0,0049                 | 0,249            |
|             | 1800                            | 0,035       | 0,035       | 0,07                | 0,2516      | 0,609    | 6,4636         | 4,77            | 1,1171 | 33,8              | 994,4                  | 4,18                | 0,0049                 | 0,217            |

| L<br>O<br>W | Kecepatan<br>kompresor<br>(rpm) | Hot Properties (MC-22) |                  |              |                  |                     | Cold Properties (water) |                   |              |                  |                |
|-------------|---------------------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------|------------------|----------------|
|             |                                 | Thot,in<br>(°C)        | Thot,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cph<br>(kJ/kg.K) | Ch=Cmin<br>(kJ/s.K) | Tcold,in<br>(°C)        | Tcold,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cpc<br>(kJ/kg.K) | Cc<br>(kJ/s.K) |
|             | 3000                            | 67,36                  | 38,24            | 52,8         | 2,1369           | 0,0144              | 28,5                    | 46,7              | 37,6         | 4,1793           | 0,0204612      |
|             | 2700                            | 64,72                  | 39,72            | 52,22        | 2,1211           | 0,0122              | 28,24                   | 43,3              | 35,77        | 4,1792           | 0,0204743      |
|             | 2400                            | 62,1                   | 38,82            | 50,46        | 2,1087           | 0,0111              | 28,28                   | 41,82             | 35,05        | 4,1793           | 0,0204799      |
|             | 2100                            | 60,52                  | 36,82            | 48,67        | 2,108            | 0,0101              | 28,64                   | 40,8              | 34,72        | 4,1793           | 0,0204822      |
|             | 1800                            | 58,14                  | 34,98            | 46,56        | 2,0895           | 0,0095              | 28,5                    | 39,1              | 33,8         | 4,1793           | 0,0204886      |

| L<br>O<br>W | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | q <sub>max</sub><br>(kW) | q <sub>act</sub><br>(kW) | ε        | Cr       | NTU (Cr<1) NTU (Cr=1) |          |          |
|-------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
|             | 3000                            | 0,55944668               | 0,372393                 | 0,665645 | 0,7036   | 0,628898              | 1,564732 | 1,990836 |
|             | 2700                            | 0,44379222               | 0,308342                 | 0,69479  | 0,594178 | 0,519797              | 1,612323 | 2,276434 |
|             | 2400                            | 0,37641635               | 0,277298                 | 0,736679 | 0,543459 | 0,439128              | 1,802606 | 2,797643 |
|             | 2100                            | 0,3224133                | 0,249063                 | 0,772497 | 0,493763 | 0,367789              | 1,975844 | 3,395541 |
|             | 1800                            | 0,28289005               | 0,217179                 | 0,767714 | 0,465831 | 0,361604              | 1,904273 | 3,305043 |

## B.2 Hasil Perhitungan pada Kecepatan *Fan* Evaporator *Medium*

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | AV (l/s) | i (Ampere) | V (Volt) | cos φ | AV air<br>(cm <sup>3</sup> /s) | T <sub>1</sub><br>(°C) | Ps<br>(bar) | h <sub>1</sub><br>(kJ/kg) | s <sub>1</sub><br>(kJ/kg.K) |
|----------------------------|---------------------------------|----------|------------|----------|-------|--------------------------------|------------------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|
|                            | 3000                            | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953 | 4,9298                         | 21,84                  | 5,21905     | 611,55                    | 2,4854                      |
|                            | 2700                            | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953 | 4,9298                         | 22,04                  | 5,42589     | 611,19                    | 2,4775                      |
|                            | 2400                            | 0,011    | 1,6        | 220      | 0,953 | 4,9298                         | 21,66                  | 5,63274     | 609,76                    | 2,4663                      |
|                            | 2100                            | 0,01     | 1,3        | 220      | 0,953 | 4,9298                         | 22,18                  | 5,97748     | 609,47                    | 2,4553                      |
|                            | 1800                            | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953 | 4,9298                         | 22,56                  | 6,32221     | 608,9                     | 2,444                       |

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan          | 2          |             |               |                | 3          |               |            | 4          |               |                    | 5          |               | 6          |               |
|----------------------------|--------------------|------------|-------------|---------------|----------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|--------------------|------------|---------------|------------|---------------|
|                            | Kompresor<br>(rpm) | T2<br>(°C) | Pd<br>(bar) | h2<br>(kJ/kg) | h2s<br>(kJ/kg) | T3<br>(°C) | h3<br>(kJ/kg) | T4<br>(°C) | P<br>(bar) | h4<br>(kJ/kg) | Density<br>(kg/m3) | T5<br>(°C) | h5<br>(kJ/kg) | T6<br>(°C) | h6<br>(kJ/kg) |
| D                          | 3000               | 67,94      | 13,0791     | 676,93        | 658,91         | 38,7       | 621,26        | 32,08      | 12,417     | 284,6         | 481,4              | 30         | 278,81        | 30,08      | 279,03        |
| I                          | 2700               | 65,26      | 12,6654     | 672,47        | 654,62         | 39,98      | 616,44        | 34,28      | 12,39      | 290,8         | 477,5              | 29,6       | 277,65        | 29,8       | 278,26        |
| U                          | 2400               | 61,82      | 12,3896     | 666,06        | 649,81         | 38,48      | 614,01        | 32,32      | 12,045     | 285,3         | 480,8              | 29,1       | 276,22        | 28,66      | 275,11        |
| M                          | 2100               | 60,64      | 12,1965     | 664,17        | 645,42         | 37,42      | 612,36        | 32,8       | 12,045     | 286,6         | 480                | 28,9       | 275,66        | 28,4       | 274,4         |
|                            | 1800               | 58,26      | 11,8242     | 660,36        | 640,2          | 35,78      | 611,55        | 32,22      | 11,686     | 285           | 480,9              | 28,4       | 274,29        | 28         | 273,3         |

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan          | 7          |               | 8          |               | 9          |               | 10          |                | 11          |                | 12          |                | 13          |
|----------------------------|--------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
|                            | Kompresor<br>(rpm) | T7<br>(°C) | h7<br>(kJ/kg) | T8<br>(°C) | h8<br>(kJ/kg) | T9<br>(°C) | h9<br>(kJ/kg) | T10<br>(°C) | h10<br>(kJ/kg) | T11<br>(°C) | h11<br>(kJ/kg) | T12<br>(°C) | h12<br>(kJ/kg) | T13<br>(°C) |
| D                          | 3000               | 7          | 278,81        | 6,52       | 279           | 20,2       | 608,61        | 24,58       | 616,48         | 28,94       | 121,39         | 47,28       | 198,05         | 28,26       |
| I                          | 2700               | 7          | 277,65        | 7,18       | 278,3         | 22,06      | 611,22        | 22,38       | 611,8          | 28,14       | 118,05         | 43,82       | 183,58         | 27,7        |
| U                          | 2400               | 8,4        | 276,22        | 7,76       | 275,1         | 20,06      | 606,87        | 25,36       | 616,47         | 27,86       | 116,88         | 41,3        | 181,33         | 28,9        |
| M                          | 2100               | 9,84       | 275,66        | 10,4       | 274,4         | 20,14      | 605,75        | 26,1        | 616,63         | 28,54       | 119,72         | 40,68       | 170,46         | 29,22       |
|                            | 1800               | 11,7       | 274,29        | 12,42      | 273,3         | 20,76      | 605,59        | 26,1        | 615,43         | 28,1        | 117,88         | 38,98       | 163,35         | 28,96       |

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan<br>Kompresor | m dot<br>MC22 | Wc         | Wcs    | Qprecooling | Qc       | Q Cond<br>Total | Qe1     | Qe2     | Q Evap<br>Total |
|----------------------------|------------------------|---------------|------------|--------|-------------|----------|-----------------|---------|---------|-----------------|
|                            | (rpm)                  | (kg/s)        | (kW)       | (kW)   | (kW)        | (kW)     | (kW)            | (kW)    | (kW)    | (kW)            |
|                            | 3000                   | 0,00674       | 0,44060759 | 0,3192 | 0,37520189  | 2,268781 | 2,644           | 1,11129 | 1,13707 | 2,24836         |
|                            | 2700                   | 0,00573       | 0,35111969 | 0,2488 | 0,32103688  | 1,865898 | 2,1869          | 0,95564 | 0,95555 | 1,91119         |
|                            | 2400                   | 0,00529       | 0,29777183 | 0,2118 | 0,27528472  | 1,738668 | 2,014           | 0,87441 | 0,90273 | 1,77714         |
| M                          | 2100                   | 0,0048        | 0,26254906 | 0,1726 | 0,24865493  | 1,563462 | 1,8121          | 0,79218 | 0,82132 | 1,6135          |
|                            | 1800                   | 0,00457       | 0,23507803 | 0,143  | 0,22295214  | 1,49171  | 1,7147          | 0,75672 | 0,78145 | 1,53817         |

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan<br>Kompresor | We1   | We2   | We<br>Total | Win    | $\eta_c$ | COP<br>Thermal | COP<br>Elektrik | HRR    | Tm<br>air | Density<br>air | Cp<br>air | m dot<br>air | Q<br>air |
|----------------------------|------------------------|-------|-------|-------------|--------|----------|----------------|-----------------|--------|-----------|----------------|-----------|--------------|----------|
|                            | (rpm)                  | (kW)  | (kW)  | (kW)        | (kW)   |          |                |                 |        | (°C)      | (°C)           | J/kg.k    | (kg/s)       | (kW)     |
|                            | 3000                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,4403 | 0,724    | 5,1029         | 4,406           | 1,176  | 38,11     | 992,9          | 4,18      | 0,0049       | 0,375    |
|                            | 2700                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,3774 | 0,709    | 5,4431         | 4,272           | 1,1443 | 35,98     | 993,7          | 4,18      | 0,0049       | 0,321    |
|                            | 2400                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,3355 | 0,711    | 5,9681         | 4,383           | 1,1333 | 34,58     | 994,2          | 4,18      | 0,0049       | 0,275    |
| M                          | 2100                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,2726 | 0,657    | 6,1455         | 4,71            | 1,1231 | 34,61     | 994,2          | 4,18      | 0,0049       | 0,249    |
|                            | 1800                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,2516 | 0,608    | 6,5432         | 4,783           | 1,1147 | 33,54     | 994,5          | 4,18      | 0,0049       | 0,223    |



| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan          | Hot Properties (MC-22) |                  |              |                  |                     | Cold Properties (water) |                   |              |                  |                |
|----------------------------|--------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------|------------------|----------------|
|                            | kompresor<br>(rpm) | Thot,in<br>(°C)        | Thot,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cph<br>(kJ/kg.K) | Ch=Cmin<br>(kJ/s.K) | Tcold,in<br>(°C)        | Tcold,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cpc<br>(kJ/kg.K) | Cc<br>(kJ/s.K) |
|                            | 3000               | 67,94                  | 38,7             | 53,32        | 2,139            | 0,0144              | 28,94                   | 47,28             | 38,11        | 4,1793           | 0,0204574      |
|                            | 2700               | 65,26                  | 39,98            | 52,62        | 2,1202           | 0,0121              | 28,14                   | 43,82             | 35,98        | 4,1792           | 0,0204726      |
|                            | 2400               | 61,82                  | 38,48            | 50,15        | 2,1122           | 0,0112              | 27,86                   | 41,3              | 34,58        | 4,1793           | 0,0204832      |
|                            | 2100               | 60,64                  | 37,42            | 49,03        | 2,105            | 0,0101              | 28,54                   | 40,68             | 34,61        | 4,1793           | 0,020483       |
|                            | 1800               | 58,26                  | 35,78            | 47,02        | 2,0906           | 0,0096              | 28,1                    | 38,98             | 33,54        | 4,1793           | 0,0204904      |

| M<br>E<br>D<br>I<br>U<br>M | Kecepatan | Kompresor  |          | qact     | ε        | Cr       | NTU (Cr<1)NTU (Cr=1) |          |
|----------------------------|-----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------------------|----------|
|                            | (rpm)     | qmax       | (kW)     | (kW)     |          |          |                      |          |
|                            | 3000      | 0,56218913 | 0,37519  | 0,667373 | 0,704638 | 0,627903 | 1,575595             | 2,006367 |
|                            | 2700      | 0,45094256 | 0,321011 | 0,711866 | 0,59339  | 0,498859 | 1,710315             | 2,470607 |
|                            | 2400      | 0,37938305 | 0,275294 | 0,725637 | 0,545397 | 0,454063 | 1,736719             | 2,644802 |
|                            | 2100      | 0,32432489 | 0,248664 | 0,766711 | 0,493267 | 0,375179 | 1,934653             | 3,286536 |
|                            | 1800      | 0,28803452 | 0,222936 | 0,77399  | 0,466082 | 0,353552 | 1,947352             | 3,424574 |

### B.3 Hasil Perhitungan pada Kecepatan *Fan* Evaporator *High*

| 1 |                                 |          |            |          |            |                   |            |             |               |                 |
|---|---------------------------------|----------|------------|----------|------------|-------------------|------------|-------------|---------------|-----------------|
|   | Kecepatan<br>Kompresor<br>(rpm) | AV (l/s) | i (Ampere) | V (Volt) | cos $\phi$ | AV air<br>(cm3/s) | T1<br>(°C) | Ps<br>(bar) | h1<br>(kJ/kg) | s1<br>(kJ/kg.K) |
| H | 3000                            | 0,014    | 2,1        | 220      | 0,953      | 4,9298            | 21,78      | 5,21905     | 613,83        | 2,485           |
| I | 2700                            | 0,012    | 1,8        | 220      | 0,953      | 4,9298            | 22,52      | 5,42589     | 612,05        | 2,4805          |
| G | 2400                            | 0,011    | 1,6        | 220      | 0,953      | 4,9298            | 21,84      | 5,63274     | 610,09        | 2,4675          |
| H | 2100                            | 0,01     | 1,34       | 220      | 0,953      | 4,9298            | 22,64      | 5,97748     | 610,31        | 2,4581          |
|   | 1800                            | 0,0095   | 1,2        | 220      | 0,953      | 4,9298            | 22,98      | 6,39116     | 609,42        | 2,4439          |

|   | Kecepatan | 2     |         |         |         | 3     |         |       | 4      |         |         | 5    |         | 6     |         |
|---|-----------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|-------|--------|---------|---------|------|---------|-------|---------|
|   | Kompresor | T2    | Pd      | h2      | h2s     | T3    | h3      | T4    | P      | h4      | Density | T5   | h5      | T6    | h6      |
| H | (rpm)     | (°C)  | (bar)   | (kJ/kg) | (kJ/kg) | (°C)  | (kJ/kg) | (°C)  | (bar)  | (kJ/kg) | (kg/m3) | (°C) | (kJ/kg) | (°C)  | (kJ/kg) |
| I | 3000      | 68,46 | 13,0791 | 678,07  | 658,78  | 39,3  | 619,99  | 32,36 | 12,39  | 285,4   | 480,9   | 30   | 278,75  | 29,98 | 278,75  |
| G | 2700      | 65,64 | 12,7343 | 673,07  | 655,86  | 40,18 | 616,18  | 34,28 | 12,403 | 290,8   | 477,5   | 29,9 | 278,48  | 29,74 | 278,09  |
| H | 2400      | 62,1  | 12,4585 | 666,44  | 650,45  | 37,78 | 614,37  | 31,6  | 12,045 | 283,3   | 482,1   | 28,6 | 274,84  | 28,14 | 273,68  |
|   | 2100      | 60,62 | 12,2517 | 663,96  | 646,56  | 35,38 | 611,35  | 32,98 | 12,045 | 287,1   | 480     | 28,9 | 275,66  | 28,46 | 274,56  |
|   | 1800      | 58,44 | 11,838  | 660,69  | 640,23  | 36,26 | 610,72  | 32,68 | 11,7   | 286,3   | 480,1   | 28,5 | 274,56  | 28,14 | 273,68  |

| H<br>I<br>G<br>H | Kecepatan | 7      |         | 8     |         | 9      |         | 10     |         | 11     |         | 12     |         | 13    |
|------------------|-----------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|
|                  | Kompresor | T7     | h7      | T8    | h8      | T9     | h9      | T10    | h10     | T11    | h11     | T12    | h12     | T13   |
|                  | (rpm)     | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)  | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)   | (kJ/kg) | (°C)  |
|                  | 3000      | 6,78   | 278,75  | 6,16  | 278,8   | 20,26  | 608,72  | 24,9   | 617,06  | 28,38  | 119,05  | 47,48  | 198,88  | 29,44 |
|                  | 2700      | 7,28   | 278,48  | 7,28  | 278,1   | 22,42  | 611,87  | 22,84  | 612,63  | 28,06  | 117,71  | 43,98  | 184,25  | 27,9  |
| 2400             | 7,74      | 274,84 | 7,34    | 273,7 | 20,26   | 607,23 | 25,18   | 616,15 | 27,76   | 116,46 | 41,24   | 180,57 | 28,72   |       |
| 2100             | 10,04     | 275,66 | 10,4    | 274,6 | 20,48   | 606,37 | 26,2    | 616,82 | 28,24   | 118,47 | 40,56   | 169,96 | 28,98   |       |
| 1800             | 11,82     | 274,56 | 12,4    | 273,7 | 21,04   | 605,85 | 26,6    | 616,11 | 27,84   | 116,79 | 38,96   | 163,27 | 28,98   |       |

| H<br>I<br>G<br>H | Kecepatan<br>Kompresor | m dot<br>MC22 | Wc         | Wcs    | Qprecooling | Qc       | Q Cond<br>Total | Qe1     | Qe2     | Q Evap<br>Total |
|------------------|------------------------|---------------|------------|--------|-------------|----------|-----------------|---------|---------|-----------------|
|                  | (rpm)                  | (kg/s)        | (kW)       | (kW)   | (kW)        | (kW)     | (kW)            | (kW)    | (kW)    | (kW)            |
|                  |                        |               |            |        |             |          |                 |         |         |                 |
|                  |                        |               |            |        |             |          |                 |         |         |                 |
|                  |                        |               |            |        |             |          |                 |         |         |                 |
|                  | 3000                   | 0,00673       | 0,43247524 | 0,3026 | 0,39098835  | 2,252604 | 2,6436          | 1,11071 | 1,13878 | 2,24949         |
|                  | 2700                   | 0,00573       | 0,34963728 | 0,251  | 0,32596068  | 1,864458 | 2,1904          | 0,95514 | 0,95844 | 1,91358         |
|                  | 2400                   | 0,0053        | 0,29881109 | 0,214  | 0,27611774  | 1,755745 | 2,0319          | 0,88129 | 0,90802 | 1,78931         |
|                  | 2100                   | 0,0048        | 0,25750927 | 0,174  | 0,25252778  | 1,556181 | 1,8087          | 0,79367 | 0,82139 | 1,61506         |
|                  | 1800                   | 0,00456       | 0,23382042 | 0,1405 | 0,22788488  | 1,479547 | 1,7074          | 0,75669 | 0,78084 | 1,53753         |

| H<br>I<br>G<br>H | Kecepatan<br>Kompresor | We1   | We2   | We<br>Total | Win    | $\eta_c$ | COP     | COP      | HRR    | Tm<br>air | Density<br>air | Cp<br>air | m dot<br>air | Q<br>air |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------------|--------|----------|---------|----------|--------|-----------|----------------|-----------|--------------|----------|
|                  | (rpm)                  | (kW)  | (kW)  | (kW)        | (kW)   |          | Thermal | Elektrik |        | (°C)      | (°C)           | J/kg.°K   | (kg/s)       | (kW)     |
|                  | 3000                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,4403 | 0,7      | 5,2014  | 4,408    | 1,1752 | 37,93     | 993            | 4,18      | 0,0049       | 0,391    |
|                  | 2700                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,3774 | 0,718    | 5,473   | 4,277    | 1,1447 | 36,02     | 993,7          | 4,18      | 0,0049       | 0,326    |
|                  | 2400                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,3355 | 0,716    | 5,9881  | 4,413    | 1,1356 | 34,5      | 994,2          | 4,18      | 0,0049       | 0,276    |
|                  | 2100                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,2809 | 0,676    | 6,2719  | 4,602    | 1,1199 | 34,4      | 994,2          | 4,18      | 0,0049       | 0,252    |
|                  | 1800                   | 0,035 | 0,035 | 0,07        | 0,2516 | 0,601    | 6,5757  | 4,781    | 1,1105 | 33,4      | 994,6          | 4,18      | 0,0049       | 0,228    |

| H<br>I<br>G<br>H | Kecepatan<br>kompresor | Hot Properties (MC-22) |                  |              |                  |                     | Cold Properties (water) |                   |              |                  |                |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------|------------------|----------------|
|                  | (rpm)                  | Thot,in<br>(°C)        | Thot,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cph<br>(kJ/kg.K) | Ch=Cmin<br>(kJ/s.K) | Tcold,in<br>(°C)        | Tcold,out<br>(°C) | Tavg<br>(°C) | Cpc<br>(kJ/kg.K) | Cc<br>(kJ/s.K) |
|                  | 3000                   | 68,46                  | 39,3             | 53,88        | 2,1375           | 0,0144              | 28,38                   | 47,48             | 37,93        | 4,1793           | 0,0204587      |
|                  | 2700                   | 65,64                  | 40,18            | 52,91        | 2,123            | 0,0122              | 28,06                   | 43,98             | 36,02        | 4,1792           | 0,0204724      |
|                  | 2400                   | 62,1                   | 37,78            | 49,94        | 2,1162           | 0,0112              | 27,76                   | 41,24             | 34,5         | 4,1793           | 0,0204836      |
|                  | 2100                   | 60,62                  | 35,38            | 48           | 2,1105           | 0,0101              | 28,24                   | 40,56             | 34,4         | 4,1793           | 0,0204844      |
|                  | 1800                   | 58,44                  | 36,26            | 47,35        | 2,0906           | 0,0095              | 27,84                   | 38,96             | 33,4         | 4,1794           | 0,0204917      |

| H<br>I<br>G<br>H | Kecepatan<br>Kompresor $q_{max}$ (kW)<br>(rpm) |            |            |          |          |          |                      |          |
|------------------|--|------------|------------|----------|----------|----------|----------------------|----------|
|                  | $q_{act}$                                      |            | $\epsilon$ |          | Cr       |          | NTU (Cr<1)NTU (Cr=1) |          |
|                  | $(kW)$   |            |            |          |          |          |                      |          |
|                  |  |            |            |          |          |          |                      |          |
|                  |  |            |            |          |          |          |                      |          |
|                  | 3000   | 0,57675259 | 0,390761   | 0,677519 | 0,70337  | 0,616065 | 1,633025             | 2,100959 |
|                  | 2700   | 0,45714323 | 0,325921   | 0,712951 | 0,594192 | 0,498028 | 1,717801             | 2,483728 |
|                  | 2400   | 0,38535393 | 0,276119   | 0,716534 | 0,547839 | 0,466646 | 1,68565              | 2,527758 |
|                  | 2100   | 0,32800868 | 0,252368   | 0,769395 | 0,494521 | 0,372233 | 1,955048             | 3,336422 |
|                  | 1800   | 0,29175043 | 0,227868   | 0,781037 | 0,465277 | 0,343955 | 1,99588              | 3,566992 |

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan dari hasil studi eksperimen pengaruh variasi kecepatan putaran kompresor pada sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi adalah sebagai berikut:

1. Performa sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi adalah COP untuk kecepatan blower *low* bernilai 5,097, COP untuk kecepatan blower *medium* bernilai 5,103 dan COP untuk kecepatan blower *low* bernilai 5,201. Sedangkan HRR untuk kecepatan blower *low* bernilai 1,175, HRR untuk kecepatan blower *low* bernilai 1,176 dan HRR untuk kecepatan blower *low* bernilai 1,175
2. Performa maksimum dari hasil studi eksperimen pengaruh variasi kecepatan putaran kompresor pada sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi dengan kecepatan putaran kompresor 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm, 2700 rpm, dan 3000 rpm didapat pada kecepatan putaran 3000 rpm baik untuk kecepatan blower *low*, *medium* dan *high*.
  - Efisiensi kompresor adalah 73%
  - COP thermal adalah 5,09
  - COP elektrik adalah 4,39
  - HRR adalah 1,17
  - *Effectiveness* adalah 0,66, dan
  - NTU adalah 1,56

#### **5.2 Saran**

Saran setelah dilakukan studi eksperimen pengaruh variasi kecepatan putaran kompresor pada sistem refrigerasi yang telah dimodifikasi adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan studi eksperimen dengan variasi panjang pipa kapiler untuk masing-masing kecepatan putaran kompresor, sehingga didapatkan spesifikasi yang memiliki

performa terbaik untuk sistem pengkondisian udara yang telah dimodifikasi.

2. Penyempurnaan isolasi untuk sistem supaya tidak banyak terjadi *losses* atau panas yang terbuang sia-sia ke lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bergman, Theodore L, dkk. Fundamentals of Heat and Mass Transfer Seventh Edition. US. John Wiley & Son's, Inc.  
<https://ianatulkhoiroh.wordpress.com/2008/06/24/natural-gas-processing-process-overview/>  
<http://refiners-notes.blogspot.co.id/2013/06/reciprocating-compressors-operation.html>  
<http://www.agussuwasono.com/artikel/teknologi/mechanical/50-kavitasi-pada-pompa.html?start=1>  
<https://hvactutorial.wordpress.com/sectioned-components/compressors/hermetic-rotary-compressor-stationary-blade>  
<http://pamungkasaryasepa.blogspot.co.id/2011>  
<http://www.hampan-mandiri.blogspot.co.id/2014>  
<https://klinikac.co.id/author/admin/page/4/>  
Moran, Michael J, dkk. Fundamental of Engineering Thermodynamics Seventh Edition. US. John Wiley & Son's, Inc.  
Nurambyah, Ragil Heri. 2011. Studi Eksperimental Perbandingan Refrigeran R-12 dengan Hydrocarbon MC-12 pada Sistem Pendingin dengan Variasi Putaran Kompresor. Surabaya.  
*Sulzer-Burkhardt, Wunterthur, Switzerland*



Halaman ini sengaja dikosongkan

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Cirebon, 27 September 1993, merupakan anak kedua dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Istiqomah Panguragan Wetan, SDN II Panguragan Wetan hingga kelas 4 kemudian lanjut kelas 5 hingga lulus di SDN III Panguragan Kulon, MTs N Arjawinangun, dan SMA N 1 Cirebon. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2011, penulis mengikuti SMITS dan diterima di Jurusan Teknik Mesin Program Studi DIII Fakultas Teknologi Industri dengan NRP

2111030105.

Selama melakukan studi di DIII Teknik Mesin ITS (D3MITS), penulis aktif dalam organisasi berupa Himpunan Mahasiswa DIII Mesin (HMDM) FTI ITS selama dua periode (2012/2013 dan 2013/2014) serta aktif dalam BEM Institut Teknologi Sepuluh Nopember (BEM ITS) selama dua periode (2012/2013 dan 2013/2014). Setelah lulus dari D3MITS pada tahun 2014, penulis melanjutkan ke jenjang Lintas Jalur Jurusan Teknik Mesin FTI ITS dengan NRP 2114105010 serta lulus pada tahun 2016.

Email : farizibrohim@gmail.com